MAYO 2008

INVESTIGACION Y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

COMPUTACION
Ordenadores cuánticos ¿Una falsa revolución?

GEOLOGIA
Rotura de las placas tectónicas

MEDIO AMBIENTE
¿Salvaremos al atún rojo?

NEUROLOGIA
Función de la sustancia blanca

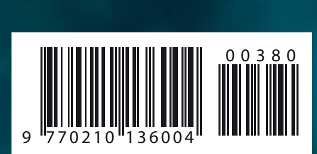
www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

El fin de la COSMOLOGIA

Cuando el universo borre las huellas de su propio origen





SUMARIO

Mayo de 2008/ Número 380



La colisión de las placas tectónicas produce tensiones y calor que resultan en la deformación de los continentes.



Se corre el riesgo de una carrera de armamentos espacial.

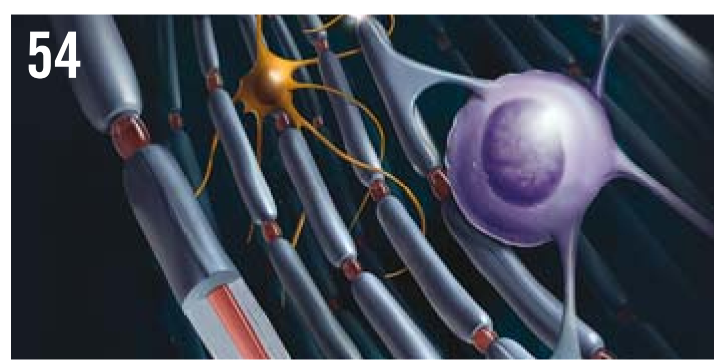


El monolito funerario que abriga los restos mortales de Janaab' Pakal se descubrió en el Templo de las Inscripciones de Palenque.

ARTICULOS



Los astrónomos del futuro no encontrarán pruebas de la naturaleza real del universo.



La mielina envuelve un axón como si se tratara de una cinta aislante, con 150 capas concéntricas entre nódulos.



El atún rojo alcanza velocidades de 80 kilómetros por hora y migra a través de océanos.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Peter Brown, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos
Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Recoletos, 11 3.º D
28001 Madrid
Tel. y fax 915 759 278
Móvil 649 933 834

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *¿El fin de la cosmología?*; J. Vilardell: *Guerra espacial*, *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Gabriel Gutiérrez Alonso: *Rotura de las placas tectónicas*; Anna Ferran: *¿Qué función cumple lasustancia blanca?*; Luis Bou: *Los límites de la computación cuántica*, *Puesta al día* y *Apuntes*; Joandomènec Ros: *El atún rojo en peligro*; Bruno Moreno: *Cartas al director*; Marián Beltrán: *Ciencia y sociedad* y *Desarrollo sostenible*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Phil Saunders, Space Channel Ltd.

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



Una cuestión semántica

En el artículo "La red semántica en acción", del pasado febrero, Lee Feigenbaum, Ivan Herman, Tonya Hongsermeier, Eric Neumann y Susie Stephens describen el desarrollo de la Red Semántica, una serie de formatos y lenguajes para encontrar y analizar información fácilmente en Internet. El problema con este sistema es que resulta difícil ponerse de acuerdo en cómo definir exactamente todos los conceptos. Cualquier aplicación informática que intente normalizar su ontología distorsionará necesariamente lo que algunos quieran expresar.

También me preocupa que, según la lógica formal tradicional, si existe una sola contradicción, es posible sacar *todas* las conclusiones posibles *y también* sus opuestos.

Robert W. Jones
Universidad estatal de Emporia, Kansas

FEIGENBAUM Y HERMAN CONTESTAN: *Es cierto que existen discrepancias entre las distintas ontologías, pero la Red Semántica no se basa en una única ontología de alcance general. Se construye a partir de pequeñas comunidades de individuos con una mentalidad parecida que pueden ponerse de acuerdo acerca de los términos que usen. Por lo tanto, las aplicaciones pueden interactuar sin necesidad de que se intente llegar a un consenso global: un sistema que presenta los productos de un establecimiento a los clientes recibe información de las bases de datos de los proveedores (que, probablemente, utilizarán formatos heterogéneos) y antes de mostrarla a los clientes la traduce a la ontología elegida por el establecimiento. Los programas automáticos para cumplimentar las declaraciones de impuestos toman los datos bancarios, conformados según las ontologías de cada banco, y los traduce a la ontología del formulario de la declaración de impuestos. No es necesario disponer de ontologías globales; una aplicación sólo necesita traducir los términos relevantes para una transacción en particular a un vocabulario común. Por supuesto, aunque el acuerdo sólo tiene que ser local, la adopción de un vocabulario existente facilita el uso compartido y la integración de la información.*

En cuanto a los peligros de utilizar la lógica tradicional, en la Red Semántica "inferencia" puede definirse como el descubrimiento de nuevas relaciones. Sin embargo, las inferencias dentro de esta red se llevan a cabo dentro de un subconjunto restringido, "protegido", de la lógica de primer orden. El razonamiento ontológico en la Red Semántica no utiliza toda la fuerza de la lógica de primer orden (o de órdenes superiores) y, por lo tanto, evita algunas de las peligrosas conclusiones que puede provocar una contradicción inferida.

¿180 grados de equivocación?

En su perfil de Hugh Everett y su interpretación de la mecánica cuántica basada en una pluralidad de mundos, "Los muchos mundos de Hugh Everett" (febrero), Peter Byrne afirma que Bryce S. DeWitt dio un giro de 180 grados [con respecto a la teoría de Everett] y se convirtió en su más firme defensor, sugiriendo así que anteriormente DeWitt tenía una opinión negativa de la teoría. De hecho, DeWitt defendió el trabajo de Everett desde el principio. DeWitt fue el responsable *de facto* de una sección publicada en el número de julio de 1957 de *Reviews of Modern Physics* que contenía las actas de un congreso de física que él y yo habíamos organizado en enero de aquel año (él no era el director habitual de la revista). DeWitt decidió incluir la tesis de Everett en las actas, aunque Everett no había asistido al congreso. DeWitt había leído la tesis a petición de John Archibald Wheeler, pero Wheeler tenía dudas sobre un trabajo que cuestionaba la manera en que Niels Bohr entendía la mecánica cuántica. DeWitt, en cambio, lo consideró "nuevo y estimulante".

Algunos años después, DeWitt descubrió que el artículo de Everett había "caído en el olvido inmediatamente" y decidió iniciar una campaña de publicidad. Esta campaña no fue un giro de 180 grados en su postura, sino la continuación del interés que mostró en 1957 por el trabajo de Everett.

No escribo esto como la viuda de Bryce, sino como colega de Bryce S. DeWitt, una colega que sabía estar en desacuerdo con él cuando era necesario. Deseo corregir una exposición equivocada de un hecho histórico.

Cecile DeWitt-Morette
Catedrática emérita Jane and Roland Blumberg Centennial
Universidad de Texas en Austin

BYRNE CONTESTA: *Los datos históricos muestran que, inicialmente, a DeWitt no le convencía la teoría de Everett. "Simplemente, yo no me bifurco", escribió en mayo de 1957. Abandonó esa objeción cuando Everett indicó que la Tierra se mueve aunque no nos demos cuenta de ello.*

Hugh Everett propuso la existencia de innumerables universos, engendrados en cada medición.



Erratum corrige

En la revista de abril 2008, núm. 379, en el artículo "Microquimerismo", en los recuadros "¿Dónde se alojan las células?" y "Preguntas habituales sobre el microquimerismo", donde dice "médula espinal" léase "médula ósea".

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

El yo. «La mayoría de nosotros vivimos tras un muro o pantalla de humo que en cierta medida oculta nuestros auténticos pensamientos, sentimientos, creencias, deseos, gustos y repulsiones. Pero la autorrevelación es algo que rebasa nuestras meras posibilidades de mostrarnos con buena o mala disposición a ella. A menudo, las personas no pueden revelarse a sí mismas, ni aunque quieran, pues desconocen su yo auténtico: lo que realmente desean, sienten o creen. A ese fenómeno del extrañamiento de uno mismo Karen Horney lo ha denominado 'autoalienación'; ha descubierto que es característico de los neuróticos. Puede que sea representativo de la sociedad moderna que tanta gente recurra al diván del psicoanalista para conocerse a sí mismo.»



Tractor de oruga para transportar cargas en terrenos difíciles, 1908

Dinamo terrestre. «La mayor dificultad con que han topado los intentos de explicar el campo magnético terrestre ha sido la introducción de la fuerza motriz que produce la simetría general del campo global. Hemos de admitir que el campo está generado por corrientes eléctricas circulares que se cierran sobre sí mismas. Con una configuración así no hay a la vista lugar alguno donde insertar una fuerza motriz, sea una batería u otra cosa. Pero la teoría de la dinamo explica la fuerza motriz como consecuencia de la rotación del planeta. La rotación es responsable de que los bucles cerrados de las corrientes parásitas tengan el mismo sentido.

—Walter M. Elsasser»

...cien años

Revista para invidentes. «La planta de impresión más blanca del mundo es sin duda aquella donde se edita la revista *Ziegler* para invidentes. Es obvio que así sea. No se emplean tipos de imprenta y nadie encontrará allí tintas de ninguna clase, salvo, claro está, en la sala de redacción. La publicación semanal se distribuye de forma gratuita entre las personas de EE.UU. y Canadá capaces de leer el alfabeto de puntos. En la sala de composición hay dos máquinas: una confecciona las planchas para la edición en el código de puntos de Nueva York; la otra se emplea para la edición en el sistema Braille americano. Desgraciadamente, ambos sistemas táctiles están muy generalizados en el país.»

[NOTA: El "New York Point" es el código de puntos para lectores invidentes que desarrolló a mediados del siglo XIX William Bell Wait; competía con el sistema Braille americano.]

Tractor "oruga". «Durante los meses pasados las autoridades militares británicas han estado experimentando con un nuevo tipo de tractor para transportar vehículos pesados sobre terrenos escabrosos e inestables. En suma, su fin es arrastrarse por el suelo valiéndose de una serie de zapatas dispuestas a lo largo de la periferia de dos pesadas cadenas laterales que pasan sobre las ruedas de proa y popa. Por lo peculiar de su movimiento, los soldados del centro militar de Aldershot, donde presta servicio, lo bautizaron de inmediato como "la oruga". El ingenio es invención de Mr. David Roberts.»

[NOTA: Las patentes de este invento se vendieron a Benjamín Holt, cofundador de Caterpillar Tractor Co.]

Vuelos furtivos. «Poco después de recibirse los primeros informes acerca de los vuelos que realizaban los hermanos Wright para probar su aeroplano, un gran número de corresponsales de periódicos visitaron el escenario de las pruebas entre las elevadas y puntiagudas dunas de arena de la costa de Carolina del Norte, al sur de Norfolk (Virginia). Sin embargo, los hermanos se negaban a efectuar vuelo alguno cuando los reporteros se acercaban, por lo cual los periodistas se vieron obligados a permanecer escondidos a una milla de distancia de los acontecimientos y limitarse a observar la máquina, cuando ésta volaba, desde lejos a través de un catalejo.»

...ciento cincuenta años

Su majestad el algodón. «Justo antes de la última crisis monetaria, el algodón había alcanzado un precio tan elevado, que los fabricantes británicos de telas e hilos se vieron obligados a reducir la producción y, como consecuencia, fuertemente incitados a idear otra forma de asegurarse un abastecimiento abundante a precios inferiores. Al depender de EE.UU. para las cuatro quintas partes del consumo, el algodón americano se consideraba el rey, por lo que buscaron ayuda en otras regiones. La última expedición, organizada bajo el mando del famoso doctor Livingstone, tiene como uno de sus principales objetivos fomentar el cultivo del algodón en Africa.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XCVIII, N.° 20, 16 DE MAYO DE 1908

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

La ecuación que Hoyle omitió

La omisión de una ecuación esencial ha podido negarle a sir Fred Hoyle todo el reconocimiento que merecía por un artículo sobre la formación de elementos químicos en las estrellas. Hoyle, fallecido en 2001 a los 86 años, fue un personaje científico con ribetes trágicos. Jamás aceptó la teoría de la gran explosión ("Big Bang"); prefirió la idea de un cosmos estacionario. Posteriormente abrazaría la hipótesis de que la vida terrícola tuvo origen extraplanetario. Es probable que esas actitudes le costaran un premio Nobel.

Pero antes de verse desdeñado, Hoyle, en un trabajo de 1954 publicado en *Astrophysical Journal*, efectuó lo que hubiera sido una aportación científica imperecedera. Exponía allí un proceso por el cual, en las estrellas de masa 10 veces la de nuestro Sol, el hidrógeno y el helio del núcleo se irían convirtiendo en elementos más pesados a través de una serie de reacciones de fusión nuclear a temperaturas progresivamente superiores. Por fin, cuando la estrella explosionara, formando una supernova, esos elementos serían proyectados al espacio y, dispersos, servirían de gérmenes para sistemas estelares todavía en gestación. Antes del trabajo de Hoyle, numerosos expertos creían que esos elementos debían haber nacido durante la gran explosión.

Según Donald Clayton, de la Universidad de Clemson y colaborador de Hoyle, los expertos, para explicar la nucleosíntesis, en lugar de citar dicho estudio solían referirse a otro artículo de 1957, con Hoyle de coautor, que se centraba en otros aspectos del problema. Clayton observó que en 30 de los más importantes artículos sobre nucleogénesis publicados entre 1960 y 1973, eran 18 los que citaban el trabajo de 1957, y sólo uno se refería al artículo de Hoyle de 1954.

En *Science* de 21 de diciembre de 2007, Clayton atribuye la cita indebida a la omisión de una ecuación de fácil deducción, implícita en el estudio de 1954. "La ecuación de Hoyle", como Clayton la llama, relaciona la masa de los elementos pesados eyectados por las estrellas moribundas con la rapidez de su deceso y con el cambio de concentración de los diversos isótopos producidos durante sucesivas reacciones nucleares. "Hoyle era un excelente matemático", señala Clayton. "Es una lástima que optase por no escribir la ecuación."

—J. R. Minkel



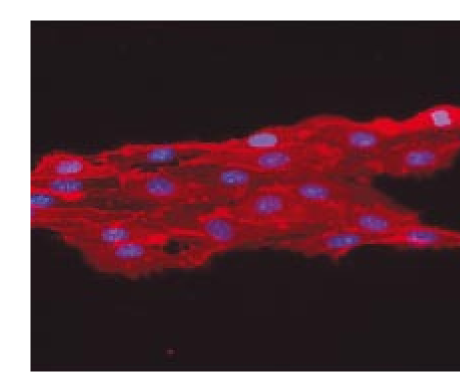
Sir Fred Hoyle

Prepararse para la gripe

Lo más probable es que la próxima pandemia de gripe se produzca cuando una mutación de un virus de gripe aviaria o porcina lo capacite para infectar células humanas. En el número de enero de *Nature Biotechnology*, se informa que la mutación crítica consistirá en que el virus desarrolle la facultad de anclarse sobre una variedad especial de unos receptores de las células pulmonares, los alfa-2-6-glicanos. Esos receptores son de dos tipos: en forma de sombrilla y cónicos. En los humanos, la versión en sombrilla (la más abundante) abre las puertas a enfermedades graves. Ese descubrimiento explica que algunas cepas de gripe se adosen a las células pero apenas infecten a los humanos (los virus se anclan a receptores cónicos); asimismo, podría utilizarse para rastrear adaptaciones a la gripe y abre vías para el desarrollo de nuevos tratamientos.

Cultivo de vasos sanguíneos

Con el objetivo de cultivar órganos de repuesto, se han utilizado "andamiajes" que incitan a las células a organizarse de determinadas formas. Pero es necesario refinar los materiales de andamiaje y su disposición geométrica, entre otros factores [*véase* "Ingeniería de tejidos: urdimbres poliméricas", por Robert Langer y Joseph P. Vacanti; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1999]. En el número de 1 de enero de 2008 de *Advanced Materials*, expertos del Instituto de Tecnología de Massachusetts exponen el modo en que una serie de surcos y resaltes de 600 nanómetros trazados sobre un sustrato de silicona proporcionó sendas donde crecieron células progenitoras endoteliales. Esas células, cultivadas en tres dimensiones, formaron tubos que podrían operar a modo de capilares. El problema consiste ahora en introducir tales constructos en nuestro organismo.



Las células crecen según el patrón grabado en el substrato.

Disparidad pertinaz

Un estudio efectuado a lo largo de más de siete años sobre una población de unos 2000 niños viene a respaldar la influencia del entorno en el cociente intelectual (CI). Se realizó un seguimiento de los residentes (afroamericanos, en su mayoría) de seis barriadas deprimidas de Chicago. Se descubrieron notables y pertinaces descensos en su destreza verbal, en comparación con sus homólogos de barrios más favorecidos. Los niños que abandonaron esas áreas deprimidas seguían presentando, años después, descensos de cuatro puntos en su CI, equivalentes a un año de escolarización. Esos hallazgos se dieron a conocer por Internet en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, el 19 de diciembre de 2007.

HULTON-DEUTSCH COLLECTION *Corbis* (*Hoyle*); KARL GRUPE *Getty Images* (*estudiante*); CHRISTOPHER BETTINGER *Instituto de Tecnología de Massachusetts* (*células*)

ENERGIA

Mejor etanol con hierbas

Para producir etanol, una gramínea perenne, *Panicum virgatum* o pasto varilla, conocida en Norteamérica por *switchgrass*, parece constituir una opción factible, y preferible al maíz. Los campesinos, en colaboración con el departamento de agricultura de Estados Unidos, han cultivado y supervisado esta planta perenne de Norteamérica, que a menudo crece silvestre en las lindes de los campos. Concretamente, para estabilizar la planta, se rastrearon las semillas, los abonos utilizados para reforzar su crecimiento, el combustible consumido para cosecharla y la pluviometría de las áreas estudiadas. El estudio, de cinco años de duración, ha demostrado que esa gramínea cultivada en parcelas de 3 a 9 hectáreas produciría entre 5,2 y 11,1 toneladas de pacas de hierba por hectárea, dependiendo de la lluvia caída. Procesados en biorrefinerías adecuadas (que ya están en construcción) estos cultivos habrían generado un 540 por ciento más de energía de la utilizada para cultivarlas, en comparación con tan sólo un 25 por ciento más de retorno energético en el caso del etanol obtenido del grano.

—David Biello



Los hierbajos superan al maíz para la producción eficiente de etanol.

CONDUCTA

Cooperación quisquillosa

Con el fin de explica por qué surge y persiste en las poblaciones la cooperación de individuos que no guardan parentesco entre sí, unos investigadores británicos han desarrollado un modelo computacional en el que los jugadores cuentan con diversos grados de cooperatividad (disposición a permitir que los socios aumenten beneficios a cuenta del jugador) y quisquillosidad (la disposición a abandonar a los socios según el trabajo en equipo que éstos realicen). Tras cada ronda del juego, un individuo recibe un pago que refleja el esfuerzo que los dos compañeros que forman un equipo ejercen. Sin embargo, los individuos salen mejor librados cuando consiguen que sean sus compañeros quienes hagan el trabajo. Después del pago, los jugadores pueden continuar juntos hasta la próxima ronda u optar por divorciarse del otro, en cuyo caso se les asociará al azar con otro jugador. Dado que los jugadores que se divorcian repetidamente han de pechar con costos más elevados que quienes siguen juntos, la cooperación y la quisquillosidad crecen al alimón cuando se juegan muchas rondas (que equivalen a largas vidas).

—Philip Yam

ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Nuevo Mundo, enfermedad nueva

Nuevas pruebas genéticas respaldan la opinión de que fue Colón quien introdujo la sífilis en Europa. La primera epidemia de sífilis registrada aconteció en 1495, dato que durante siglos ha alimentado el debate sobre si la espiroqueta llegó de las Américas o si existía previamente en el Viejo Continente, pero sin que se la distinguiese hasta 1500 de otras enfermedades de la piel. Con el fin de averiguar los orígenes de la sífilis, científicos de la Universidad Emory y sus colaboradores han comparado genéticamente cepas de espiroqueta procedentes de todo el mundo con bacterias emparentadas, y han observado que los parientes más cercanos eran variantes sudamericanas de la frambesia, una enfermedad que se contagia por contacto epidérmico y geográficamente limitada a zonas húmedas y cálidas. Una teoría sugiere que la sífilis solamente empezó a transmitirse por vía sexual tras su llegada a Europa, donde el clima, más frío, y el uso de ropas limitaban sus otras posibles formas de difusión. Los investigadores conjeturan que, en última instancia, los ancestros de la sífilis pueden ser tan antiguos como la humanidad. Habrían dado el salto a América debido a migraciones milenios antes de la llegada de Colón.

—Charles Q. Choi



Infección de frambesia, la bacteria *Treponema pertenue*, emparentada con la espiroqueta de la sífilis.

CHARLIE NEIBERGALL *AP Photo (hierbajos)*; CDC/DR. PETER PERINE (PHIL #3842), 1979 *(infección de frambesia)*

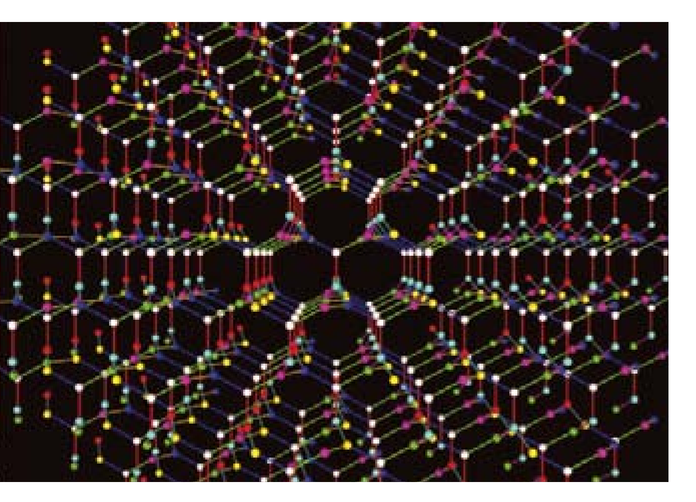
GEOMETRIA

Matemática cristalina

Los diamantes son rarezas no sólo entre los minerales, sino también en las matemáticas. La estructura cristalina del diamante posee dos notas distintivas esenciales: su simetría es máxima, es decir, no es posible reordenar sus componentes y lograr que la estructura resulte más simétrica de lo que ya es, y por otra parte cuenta con un potente tipo de isotropía, pues ofrece el mismo aspecto al ser examinado desde la dirección de cualquier arista. En el número de febrero de *Notices of the American Mathematical Society*, Toshikazu Sunada, de la Universidad nipona de Meiji, señala que de entre un universo, en teoría infinito, de cristales que matemáticamente podrían existir, sólo hay otro que comparta estas propiedades con el diamante. Mientras que el diamante constituye una malla de anillos hexagonales, su pariente está formado por anillos de 10 lados.

Sunada estaba en la creencia de que nadie había descrito con anterioridad este objeto (al que él bautizó K4). Pero tras haber publicado su trabajo, químicos y cristalógrafos le informaron que hacía mucho que tenían noticia del cristal, llamado (10,3)-a por A. F. Wells en 1977. El gemelo matemático del diamante existe, en una variante ligeramente distorsionada, como una estructura de átomos de silicio en siliciuro de estroncio.

—*Charles Q. Choi*



Dos entre una infinidad: sólo el cristal de diamante y el cristal K4 —también llamado (10,3)-a—, aquí representado cuentan con simetría máxima y ofrecen el mismo aspecto al ser vistos desde cualquier arista.

NANOTECNIA

Control magnético de células

Para detectar lo que las rodea, las células utilizan las proteínas receptoras que tachonan su superficie. Estos receptores se ligan a moléculas específicas y desencadenan así una cascada de acontecimientos bioquímicos, que desembocan en conductas celulares, como la secreción de hormonas o la destrucción de patógenos. Pero antes de que los receptores puedan activarse, a menudo tienen que juntarse unos con otros. Donald Ingber, de la facultad de medicina de Harvard, y sus colaboradores han demostrado que pueden controlar esta activación mediante partículas de óxido férrico unidas a moléculas de dinitrofenil (DNP), que se ligan a los receptores de los mastocitos, productores de histamina. Estas perlitas de 30 nanómetros de diámetro se atraen entre sí cuando se las magnetiza y fuerzan a los receptores a apiñarse y activarse. Los investigadores detectaron un pico en las concentraciones de calcio del interior de las células, el primer paso en la secreción de histamina. Esta técnica podría permitir biosensores más livianos y de menor consumo energético para la detección de patógenos o nuevas formas de suministrar fármacos al organismo.

—*J. R. Minkel*

DATOS

Pista libre

El año pasado, la NASA dejó de publicar datos útiles de su estudio sobre seguridad del transporte aéreo, pues la agencia consideró que mermarían la confianza del público. Pero otro estudio hace ver que los siniestros resultantes de errores del piloto en los transportes aéreos estadounidenses descendió entre 1983 y 2002. El análisis, debido a Susan P. Baker y sus colaboradores de la Universidad Johns Hopkins atribuye las mejoras a la superior formación de las tripulaciones y a los avances técnicos, que proporcionan datos más exactos y fiables sobre la posición de la aeronave o el mal tiempo. Sin embargo, la tasa general de siniestros permanece sensiblemente constante, debido, tal vez, al mayor número de errores del personal de tierra y de los controladores aéreos, obligados a gestionar muchos más vuelos que en el pasado.

TOTAL DE SINIESTROS ANALIZADOS EN EL ESTUDIO: **558**

SINIESTROS PROVOCADOS POR ERRORES DE PILOTAJE: **180**

SINIESTROS DEBIDOS A OTRAS CAUSAS: **378**

SINIESTROS POR ERROR DE PILOTAJE POR 10 MILLONES DE VUELOS EN:

1983-1987: **14,2**

1998-2002: **8,5**

DESCENSO EN SINIESTROS POR ERROR DE PILOTAJE POR CADA 10 MILLONES DE VUELOS:

POR DECISIONES INCORRECTAS: DE **6,2** A **1,8**

POR INTERACCION DEFICIENTE DE LA TRIPULACION: DE **2,8** A **0,9**

POR HABER AFRONTADO MAL CONDICIONES DE VIENTO O DE LA PISTA DEFICIENTES: DE **2,5** A **0,54**

FUENTE: Aviation, Space and Environmental Medicine, *enero de 2008*

HISASHI NAITO (*cristal*); MATT COLLINS (*dibujo*)

¿Amantes o rivales?

Nuevas investigaciones genéticas indican que los humanos modernos se cruzaron con el Homo erectus

La cuestión de si los humanos modernos se cruzaron o guerrearon con sus congéneres de otras especies ha sido tema de debate, a menudo enconado, durante décadas. Murray Cox, de la Universidad de Arizona, ha descubierto los indicios más claros hasta ahora de que los humanos modernos se cruzaron con *Homo erectus*, una especie surgida hace alrededor de dos millones de años y de la que muchos creen que se encuentra en la línea evolutiva que llega hasta nosotros.

La tesis de una propagación "a partir de Africa" se basa fundamentalmente en estudios del cromosoma Y sumados a los de las mitocondrias, estructuras generadoras de energía en la célula que tienen su propio pequeño genoma y se transmiten por línea femenina. Toda la moderna variación de estas secuencias se remonta a Africa y muestra antepasados comunes hasta cierto punto recientes. (La ausencia de fósiles que sean híbridos también apoya esta idea.)

Según Cox, existen, sin embargo, muchos otros lugares donde pueden estar escondidos los genes de nuestros parientes. Estudiando las características genéticas de las poblaciones humanas modernas, su equipo ha hallado una región del cromosoma X, la RRM2P4, que muestra grandes diferencias entre personas de distintos lugares, señal de una antigua separación genética. Para precisar los orígenes de ese gen, los investigadores secuenciaron 250 individuos, la mitad procedente de Africa y, el resto de China, Asia Central, País Vasco e islas del Pacífico.

Tras delimitar la fecha de su separación según las diferencias entre las secuencias genéticas, los investigadores concluyeron que la última vez que las distintas formas de RRM2P4 compartieron un antepasado común fue hace alrededor de dos millones de años, más o menos cuando *Homo erectus* emigró desde Africa hasta Asia. Y la variante más antigua parece haberse originado en Asia, el único lugar, casi, donde se encuentra en la actualidad.

Cox cree que la combinación entre gran antigüedad y orígenes asiáticos es convincente. Los fósiles sugieren que el *H. erectus* podría haber sobrevivido en Asia hasta hace aproximadamente 30.000 años, solapándose con los humanos modernos durante alrededor de 15.000 años. La variante del gen es más común precisamente donde se encuentran fósiles del *H. erectus*, dice Cox, que expone su descubrimiento en el número de enero de *Genetics*. El equipo también utilizó nuevas técnicas estadísticas para demostrar que es considerablemente más probable que el gen surgiera en Asia y no en Africa. La posibilidad de que hubiera cruzamiento entre el *H. erectus* y los humanos modernos es lo más sorprendente, añade, porque la mayoría de los investigadores cree que no hay indicios de que hayamos intercambiado nuestros genes con los de los neandertales, que tienen un parentesco más cercano con nosotros.



Según un nuevo estudio genético, los humanos modernos pudieran haberse cruzado con *Homo erectus*.

REGIS BOSSU *Sygma/Corbis*

Otros observan que hay muchos factores que pueden crear divisiones genéticas profundas entre los grupos humanos. Nadie discute que la mayor parte de nuestro genoma tiene un origen africano reciente. Pero esa preponderancia hace difícil determinar qué aspectos podrían ser el legado de un cruzamiento de menor intensidad con otras líneas evolutivas y cuáles deberse al puro azar. A lo largo de todo el genoma, algunos grupos mostrarían grandes diferencias aunque hubieran salido todos de Africa al mismo tiempo, explica Peter Underhill, de la Universidad de Stanford. "Cuando uno ve estos resultados, ¿son realmente representativos de que algo singular ocurrió, o son sólo extremos de las distribuciones normales? Para mí, es una cuestión que sigue abierta", afirma.

Otra posibilidad es que la forma asiática de RRM2P4 hubiese estado presente en un grupo que salió de Africa y más tarde se extinguió en Asia. O simplemente, que no se hubiera examinado al suficiente número de africanos como para encontrarlo; de hecho, la secuencia de ADN que Cox y sus colaboradores piensan que vino del *H. erectus* se halló en un africano. Peter Forster, de la Universidad Anglia Ruskin de Cambridge, que se dedica a la paleogenética, sostiene que este descubrimiento da a entender que el RRM2P4 asiático probablemente sí se originó en Africa. Encontrar ese gen en un africano arruina la idea de un antiguo cruce.

Cox lo rebate diciendo que la secuencia RRM2P4 de este africano es idéntica a la del grupo asiático y sugiere que esta persona probablemente descendió de inmigrantes asiáticos recientes. El equipo también tiene datos preliminares de una segunda región de ADN que muestra una separación igualmente antigua; un grupo parece ser exclusivamente asiático.

El gen de una sola persona no puede zanjar la cuestión, según Rosalind Harding, de la Universidad de Oxford. Aun así, varios estudios sugieren que el genoma humano registra sorprendentes y profundas separaciones entre poblaciones. Su grupo, por ejemplo, ha descubierto que parte del gen de la hemoglobina parece muy antiguo. Si continúan descubriéndose antiguas secuencias, con el tiempo los paleogenéticos podrían convencerse de que todos llevamos un pequeño *erectus* en la sangre.

John Whitfield

DESCUBRIR ANTEPASADOS EN NUESTROS GENES

Los investigadores llevan tiempo debatiendo acerca de dos teorías generales sobre el origen de los humanos modernos; si nuestros antepasados salieron de Africa en una sola oleada hace menos de 100.000 años o si somos el resultado de varias oleadas que salieron de Africa y se cruzaron. Hay algo en lo que todos están de acuerdo y es que leer nuestra historia en los genes está plagado de dificultades. Cada vez resulta más fácil recopilar cantidades de información, pero determinar qué secuencias utilizar, a quiénes tomar la muestra y cómo identificar los legados genéticos de la selección natural, la migración y los cuellos de botella de la población, es dificilísimo. Incluso análisis relativamente sencillos implican suposiciones y conjeturas elaboradas y pueden suponer un trabajo de miles de horas delante del ordenador.

Autosincronización de autómatas celulares

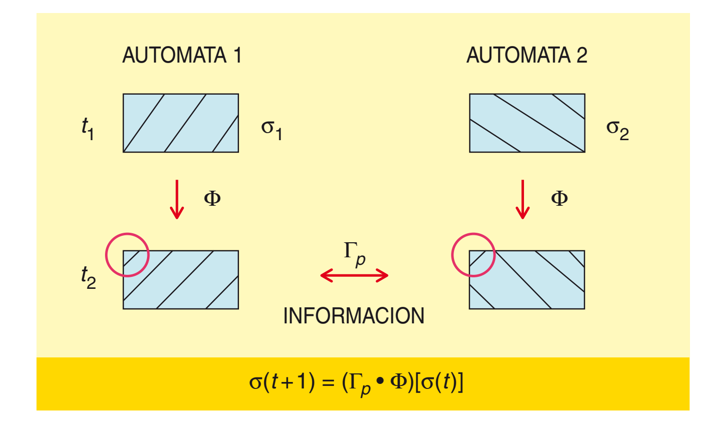
Para sincronizar un autómata celular con otro o consigo mismo, basta igualar entre sí una fracción de sus casillas mayor que un valor crítico

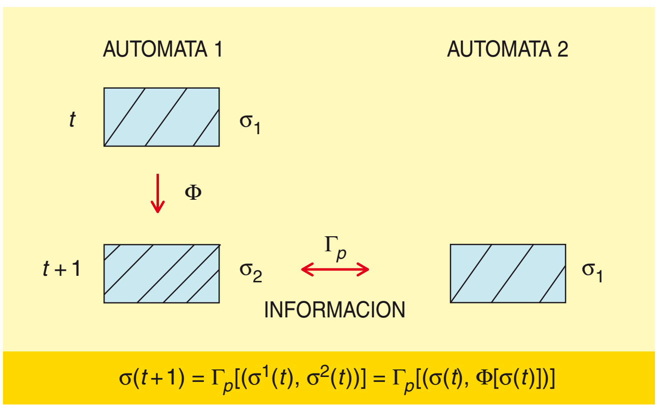
Los sistemas extensos presentan patrones que, una vez adquiridos, pueden ser estáticos en el tiempo. En general, se trata de patrones inestables: ante cualquier pequeña perturbación, el sistema que los exhibe evoluciona hacia una dinámica *espaciotemporalmente compleja,* según una denominación habitual. Significa que no hay una estructura repetida, ni en el espacio ni el tiempo, a lo largo de la evolución del sistema.

La evolución de los valores de la bolsa puede servirnos de ejemplo del tipo de sistemas al que nos referimos. Cualquier periodicidad en su estructura valdría de herramienta de predicción y anularía su carácter aleatorio, impredictible. Como ejemplo contrapuesto sirva el despliegue de la información del ADN de un ser vivo en sus primeras fases. Si no hay errores de decodificación, acaba generando la forma característica de un individuo típico de la especie correspondiente. Sería el patrón fijo hacia el que evoluciona ese sistema extenso.

Se han desarrollado, en los últimos años, diferentes técnicas de sincronización que, en principio, valdrían para discernir cuáles son los patrones fijos de un sistema extenso. Expliquemos primero de forma sencilla en qué consiste el fenómeno de la *sincronización*. De dos o más sistemas que tienen un comportamiento similar en el tiempo, aunque sea con un cierto desfase, decimos que están sincronizados. A no ser que los sistemas sean idénticos y las condiciones iniciales hayan sido las mismas, esta consonancia dinámica requiere un intercambio de información entre ambos sistemas.

En condiciones normales, el intercambio de información se realiza de una forma continua en el tiempo y exige la visibilidad total o parcial entre ambos sistemas. Esta estrategia se ha aplicado en multitud de situaciones, sobre todo entre osciladores caóticos, bajo muy diferentes técnicas. Cuando se unen muchas de estas unidades, se recurre a la introducción en la dinámica individual de cada unidad de un campo medio, bien sea aditivo, bien sea multiplicativo, para provocar la sincronía de todo el





1. Técnica de sincronización estocástica de dos autómatas celulares (AC), σ_1 y σ_2, que evolucionan bajo la regla Φ (*izquierda*). El operador estocástico Γ_p, comandado por el parámetro p, con $0 < p < 1$, se encarga de elegir aleatoriamente en cada iteración una proporción p de entre todos los sitios de ambos AC y de hacerlos iguales. Técnica de autosincronización estocástica (*derecha*). En este caso, el papel de uno de los AC lo desempeña la "iteración presente", $\sigma_1 = \sigma(t)$, y el otro AC es la "iteración anterior", $\sigma_2 = \sigma(t-1)$.

conjunto. En este caso, cada uno de los elementos no tiene conocimiento exacto de la dinámica ni de una ni de varias de las unidades de ese conjunto; sólo poseerá información del comportamiento medio del sistema global.

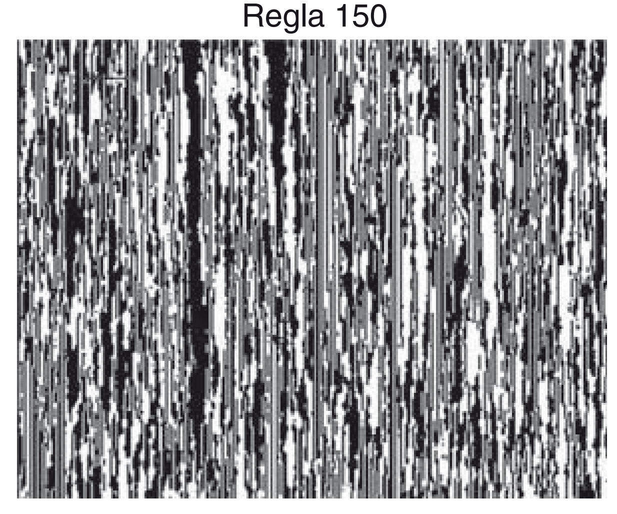
Cuando los sistemas son extensos, la visibilidad completa se hace también inviable en la práctica por el gran flujo de información que habría que habilitar entre ambos sistemas. De nuevo, es más realista suponer que los sistemas no resultan completamente visibles entre ellos y que, por tanto, sólo pueden intercambiar información parcial de su actual estado dinámico, entre partes fijas de dichos sistemas o entre partes seleccionadas al azar (*sincronización estocástica*). La limitación en el traspaso de información hace prever la existencia de una cantidad mínima de la misma cuya superación lleva a los sistemas a sincronizarse.

Pero pensemos ahora que, en vez de contar con dos sistemas extensos distintos, tenemos uno solo, tomado en dos tiempos distintos. Si de alguna manera se aplica la estrategia anterior entre las estructuras que presenta el sistema en esos dos tiempos diferentes, podría generarse, en principio, una sincronización de estructuras actuales con estructuras de su pasado. El sistema sufriría el fenómeno que hemos denominado *autosincronización*. Quiere decir que el sistema quedaría congelado en una estructura fija en el tiempo. Podría pensarse entonces en emplear este método para encontrar sus estructuras fijas.

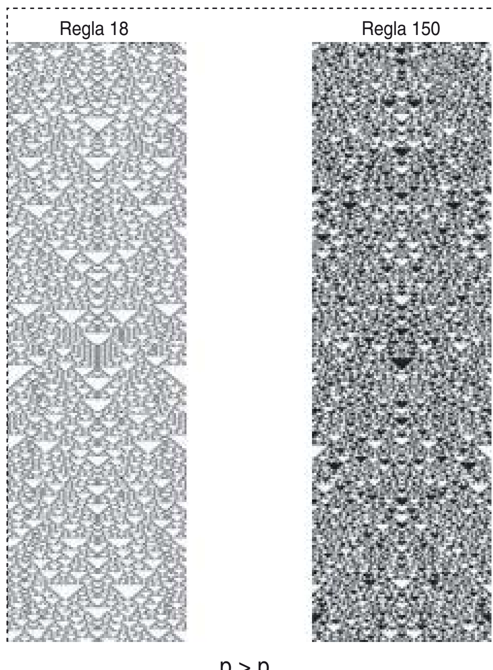
Del mismo modo, si en vez de tomar dos configuraciones a dos tiempos distintos, se toma una sola de ellas, por ejemplo la estructura actual del sistema, y ésta se divide a cada tiempo en dos partes a las que se aplica el método de sincronización, la evolución del sistema puede derivar en una estructura final simétrica respecto a la frontera que separa las dos partes espaciales en que se dividió. Es lo que hemos dado en llamar *autosincronización por simetría*.

Hemos ensayado todas estas técnicas sobre los sistemas dinámicos extensos más sencillos que podemos encontrar: los *autómatas celulares*. Un autómata celular (AC) es un sistema extenso discreto en el espacio y en el tiempo. La versión unidimensional de un AC está formada por una ristra de N sitios o células, numerados por el índice $i = 1,\ldots, N$, donde la variable local σ_i puede tomar un valor binario, o bien 0 o bien 1. El valor de cada uno de los sitios en el tiempo t representa una configuración del sistema. La nueva configuración a tiempo $t + 1$ viene determinada por la regla Φ de evolución del sistema.

2. Evolución de un AC bajo la regla 150 y la técnica de autosincronización estocástica. La ristra espacial de sitios es el eje horizontal y la evolución temporal es el eje vertical, de arriba hacia abajo. El sistema no se congela en ningún patrón estable, sino que se establece una competición entre los patrones estacionarios de la regla 150: los elementos 11, 01 y 00.



En condiciones normales se trabaja con un acoplamiento a primeros vecinos, es decir, el valor $\sigma_i(t + 1)$ es función de los valores que el sistema toma en el propio sitio $\sigma_i(t)$ y de los dos vecinos más próximos, esto es, $\sigma_{i-1}(t)$ y



Regla	18	22	30	54	60	90	105	110	122	126	146	150	182
p_c	0,25	0,27	1,00	0,20	1,00	0,25	0,37	1,00	0,27	0,30	0,25	0,37	0,25

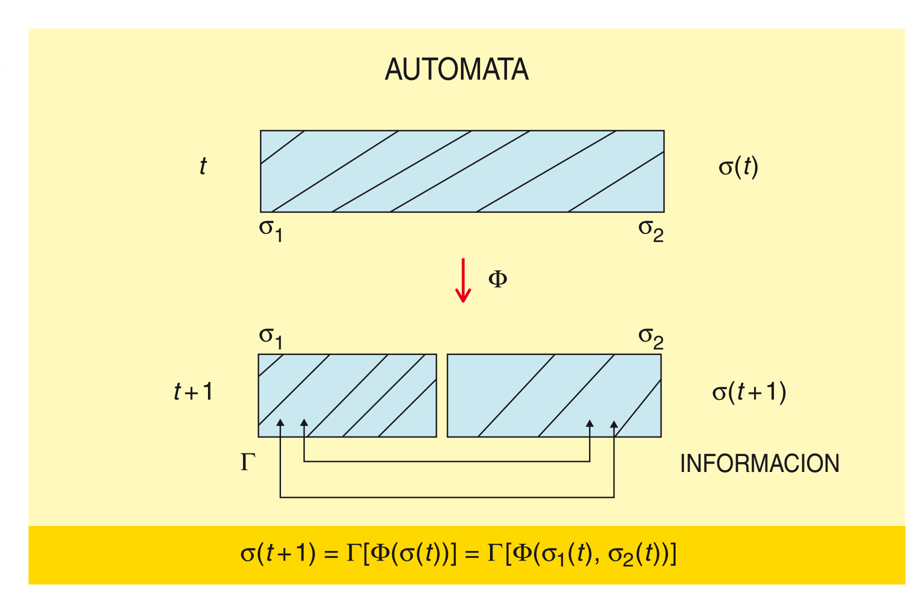
3. Evolución espaciotemporal de las reglas 18 y 150 bajo la técnica de autosincronización estocástica por simetría. Obsérvese que las dos mitades en las que se parte el sistema se autosincronizan después de una fase transitoria, hecho que puede observarse por la simetría especular que presentan los patrones. Se ofrece, además, una tabla que muestra el parámetro crítico p_c para las diferentes reglas cuando evolucionan bajo ese tipo de autosincronización.

$\sigma_{i+1}(t)$. Así, podemos escribir la evolución dinámica del AC de la forma: $\sigma(t+1) = \Phi[\sigma(t)]$, que localmente se expresa $\sigma_i(t+1) = \varphi[\sigma_{i-1}(t), \sigma_i(t), \sigma_{i+1}(t)]$, siendo φ la particularización local de la regla Φ.

Hay que observar que, para cada célula, hay 2^3 posibles entornos distintos y cada uno de ellos puede tomar uno de los valores binarios, con lo cual el número de reglas distintas posibles es de 2^8. La forma de aplicar una de esas reglas es pasar a binario el número decimal que representa la regla correspondiente y asignar, por orden correlativo, cada uno de los 8 bits de esa representación a cada uno de los 8 posibles entornos. Así, por ejemplo, la regla $\Phi = 18$ en binario es 00010010, con lo cual su particularización es como sigue: $\varphi(0,0,0) = 0$, $\varphi(0,0,1) = 1$, $\varphi(0,1,0) = 0$, $\varphi(0,1,1) = 0$, $\varphi(1,0,0) = 1$, $\varphi(1,0,1) = 0$, $\varphi(1,1,0) = 0$ y $\varphi(1,1,1) = 0$.

Cada una de estas reglas produce una evolución dinámica distinta. Stephen Wolfram clasificó en los años ochenta las diferentes estructuras que generan las 256 reglas en cuatro grandes grupos con comportamientos distintos. Uno de estos grupos corresponde a las reglas que producen un comportamiento espaciotemporal complejo; es el caso de las reglas 18, 22, 90 y 150.

Nos hemos centrado en ensayar las técnicas de autosincronización antes explicadas sobre este tipo particular de autómatas. La técnica de sincronización estocástica de dos AC se resume en el esquema de la *figura 1 a la izquierda*. El operador estocástico Γ_p, comandado por el parámetro p, con $0 < p < 1$, se encarga de elegir aleatoriamente en cada iteración una proporción p de entre todos los sitios de ambos AC y de hacerlos iguales. Todas las reglas presentan una transición a la sincronización para un p crítico (p_c) que vale alrededor de 0,25. La aplicación de esta metodología a un solo AC, la autosincronización, se presenta en la *figura 1 a la derecha*.



4. Técnica de autosincronización estocástica por simetría. En este caso el papel de uno de los autómatas celulares lo desempeña una mitad de la iteración presente, $\sigma_1 = [\sigma_i(t), i = 1, ..., N/2]$, y el otro autómata celular es la parte restante, $\sigma_2 = [\sigma_i(t), i = N/2 + 1, ..., N]$.

En general, esta técnica no llega a congelar al autómata en una estructura, tal como se muestra en la *figura 2* para la regla 150, donde se establece una competición entre los diferentes patrones estacionarios del sistema. Este comportamiento encuentra una excepción notable en la regla 18, que sí llega a congelarse en su estructura estable, que es el patrón nulo.

En el caso de la autosincronización por simetría, cuyo esquema se muestra en la *figura 4*, el sistema se autosincroniza para todas las reglas que presentan una simetría derecha-izquierda, $\varphi[\sigma_{i-1}(t), \sigma_i(t), \sigma_{i+1}(t)] = \varphi[\sigma_{i+1}(t), \sigma_i(t), \sigma_{i-1}(t)]$, tal como las reglas 18 y 150 que se muestran en la *figura 3*. En la tabla inferior de la ilustración se dan también los valores críticos p_c para los que se consigue la autosincronización por simetría en las diferentes reglas.

Ricardo López Ruiz
Dpto. de Informática, Facultad de Ciencias y BIFI, Universidad de Zaragoza

Juan Roberto Sánchez
Dpto. de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina

Anemia de Fanconi

La comprensión de los fallos moleculares que subyacen bajo este trastorno genético nos permitirá conocer mejor los mecanismos de reparación del ADN y promover una quimioterapia más eficaz

El ADN de las células se halla expuesto a la agresión por parte de agentes físicos y químicos del medio. Cualquier daño en el ADN reviste un peligro especial, ya que puede ocasionar la muerte de la célula o la transformación de ésta en cancerígena. Las células cuentan con un repertorio de mecanismos de protección y reparación del ADN que garantizan su supervivencia. La disfunción de esos mecanismos constituye la causa de numerosas enfermedades, letales algunas.

En contraposición, esos mismos mecanismos de reparación son la causa de la escasa eficacia de tratamientos de quimioterapia en algunos tumores. Los agentes quimioterapéuticos (el *cis*-platino, por ejemplo) suelen lesionar el ADN, daño que impide la correcta duplicación del ADN y determina, en última instancia, la muerte celular. El tumor acaba eliminándose porque las células tumorales se dividen a una velocidad desmesurada y,

por tanto, son más sensibles a la quimioterapia. No obstante, las demás células del organismo también sufren el ataque del agente quimioterapéutico, sobre todo las que se dividen continuamente, como las progenitoras del cabello o las precursoras de las células sanguíneas. De esa acción generalizada de la quimioterapia se derivan la caída del cabello y otros efectos secundarios indeseados.

Los mecanismos naturales de reparación del daño celular hacen, pues, que, en muchos casos, deba administrarse una dosis de quimioterapia muy alta. En efecto, para eliminar las células tumorales, el fármaco debe doblegar los mecanismos de protección. Se ha visto también que algunos tumores de ovario que suelen tratarse con *cis*-platino, acaban desarrollando resistencia a este compuesto; la terapia pierde entonces toda eficacia.

Parte de la investigación en quimioterapia se centra en los mecanismos de reparación del daño génico. Si se lograra provocar en la célula tumoral la disfunción de esos mecanismos de protección, se rebajaría la dosis necesaria de quimioterapia y, por tanto, se recortarían los efectos secundarios. Además, se evitaría el desarrollo de tumores resistentes al tratamiento. La investigación sobre la base molecular de enfermedades causadas por la disfunción del sistema de reparación y protección génica ha arrojado luz sobre los mecanismos celulares de resistencia contra agentes antitumorales.

La anemia de Fanconi y la ruta FA/BRCA

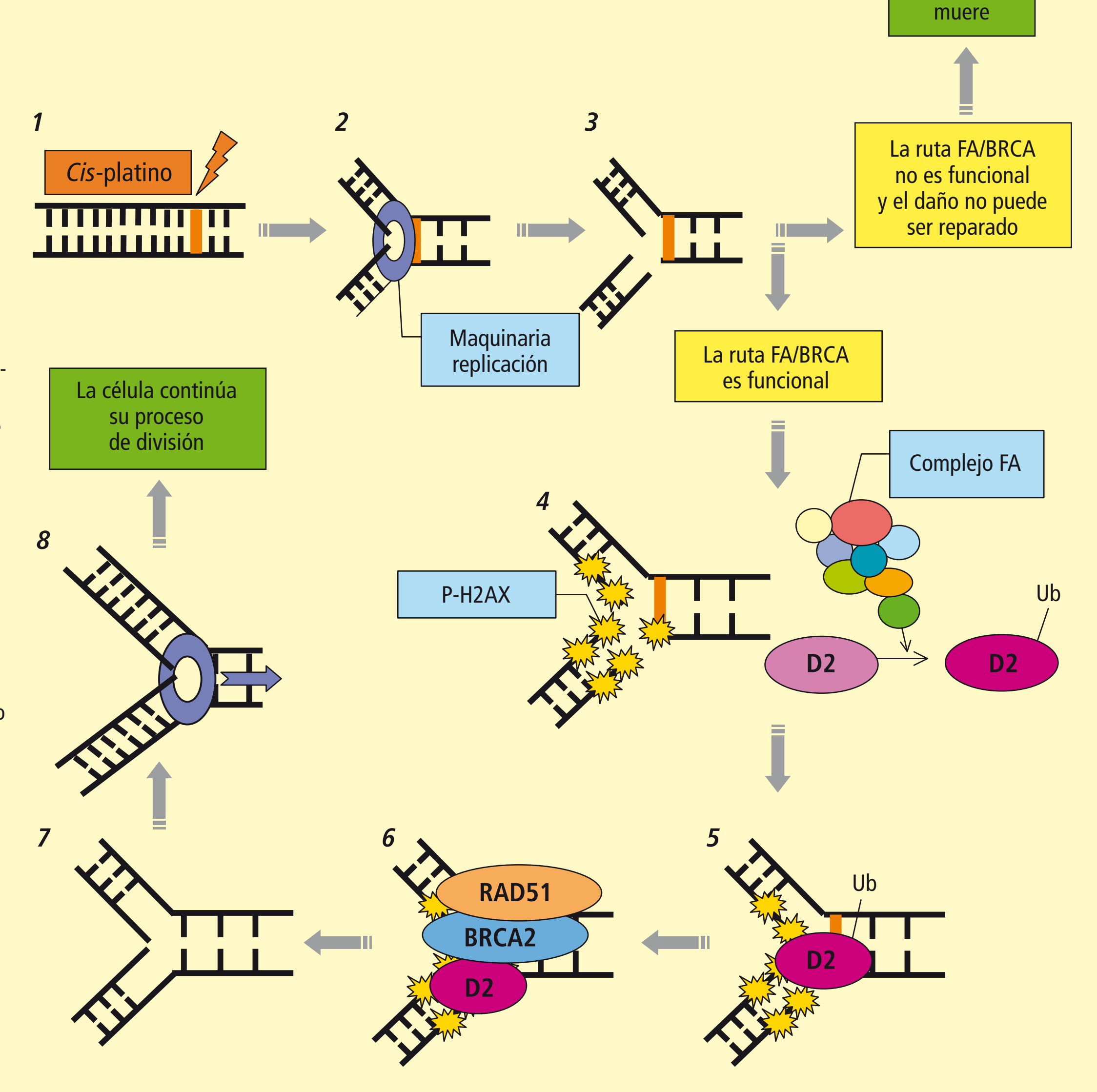
Una de esas enfermedades es la anemia de Fanconi. Este trastorno genético humano se caracteriza por presentar un fallo medular progresivo, que suele conllevar trombopenia (descenso del recuento de plaquetas) o pancitopenia (descenso del recuento total de células sanguíneas). La acompañan otros trastornos hematológicos (síndrome mielodisplásico o leucemia mieloide aguda), así como una cohorte de anomalías congénitas, endocrinopatías y tumores sólidos.

Las células de los pacientes con anemia de Fanconi se muestran muy sensibles ante determinados agentes citoestáticos, como la mitomicina C, el diepoxibutano y el *cis*-platino, que inducen un tipo particular de daño en el ADN: los enlaces cruzados. Los enlaces cruzados impiden el avance de la horquilla de replicación y generan roturas en la cadena de ADN. De ahí que tales pa-

RUTA FA/BRCA

La célula cuenta con mecanismos que reparan las horquillas de replicación bloqueadas. El *cis*-platino (agente quimioterapéutico) genera entre las dos cadenas de ADN enlaces cruzados (***1***) que impiden el avance de la horquilla de replicación (***2***). Por ello, se producen roturas en el ADN. La ruta FA/BRCA se encarga de reparar la rotura; si falla esa vía, la célula, incapaz de dividirse, muere (***3***).

Para reparar la rotura, se fosforila la histona H2AX, al propio tiempo que se monoubiquitina la proteína FANCD2 mediante el complejo FA (***4***). Una vez activada, FANCD2 se dirige al sitio del daño, atraída por la H2AX fosforilada (***5***). FANCD2 permite la carga de proteínas de reparación por recombinación homóloga, como BRCA2 y RAD51 (***6***). La rotura se repara (***7***). La maquinaria de replicación se coloca otra vez sobre la cadena de ADN y prosigue la replicación (***8***).



cientes presenten mayor número de roturas cromosómicas que una persona sana.

Bajo la anemia de Fanconi subyace un fallo en la ruta FA/BRCA, la vía molecular encargada de la reparación de las horquillas de replicación bloqueadas. Se conocen hasta 13 genes responsables de la enfermedad: *FANCA, FANCB, FANCC, FANCD1/BRCA2, FANCD2, FANCE, FANCF, FANCG, FANCI, FANCJ/BRIP1, FANCL, FANCM* y *FANCN/PALB2*. Tres (*FANCD1*, *FANCJ* y *FANCN*) son también genes de susceptibilidad al cáncer de mama.

La mayoría de los productos de esos genes se unen para formar el complejo proteico FA, cuya función estriba en activar la proteína central de la ruta: FANCD2. Una vez activada mediante monoubiquitinización, FANCD2 se dirige al sitio dañado; allí se colocaliza con otras proteínas, como FANCD1/BRCA2, que llevan a cabo la reparación del daño por recombinación homóloga.

En el sistema de regulación de la ruta FA/BRCA participan numerosas moléculas: quinasas (ATR), proteínas de señalización del daño (H2AX) y otras (USP1, BRCA1, NBS1 o BLM); las tres últimas proteínas intervienen a su vez en otras vías de reparación del daño celular: su defecto causa otras enfermedades raras con predisposición al cáncer, como los síndromes de Bloom o de Nijmegen.

Las personas que sufren anemia de Fanconi corren un riesgo muy alto de cáncer. Desarrollan leucemias o tumores sólidos, sobre todo en cabeza y cuello, a edades tempranas. El tratamiento del cáncer en esos pacientes entraña una gran complejidad, pues la hipersensibilidad de sus células ante los agentes quimioterapéuticos hace que el tratamiento elimine todas las células de su organismo, y no sólo las tumorales. Si lográramos bloquear la ruta FA/BRCA en las células tumorales de una persona con un tumor incipiente, se volverían hipersensibles a la quimioterapia, de forma que la eliminación del tumor requeriría una dosis menor.

Inhibición de la ruta FA/BRCA

Con ese objetivo, se ha realizado un experimento *in vitro* con células tumorales, basado en la inhibición de la proteína FANCD2 y el posterior estudio de la sensibilidad a agentes inductores de enlaces cruzados. Por gen diana se eligió a *FANCD2* para la inhibición, pues desarrolla la función principal en la ruta FA/BRCA. La investigación sobre portadores de versiones mutadas de ese gen ha demostrado que todos los pacientes cuentan con un pequeño porcentaje de proteína funcional; de lo que cabe inferir que la ausencia total de esta proteína resulta letal. Además, ese gen constituye uno de los pocos genes Fanconi que se han conservado en el curso de la evolución.

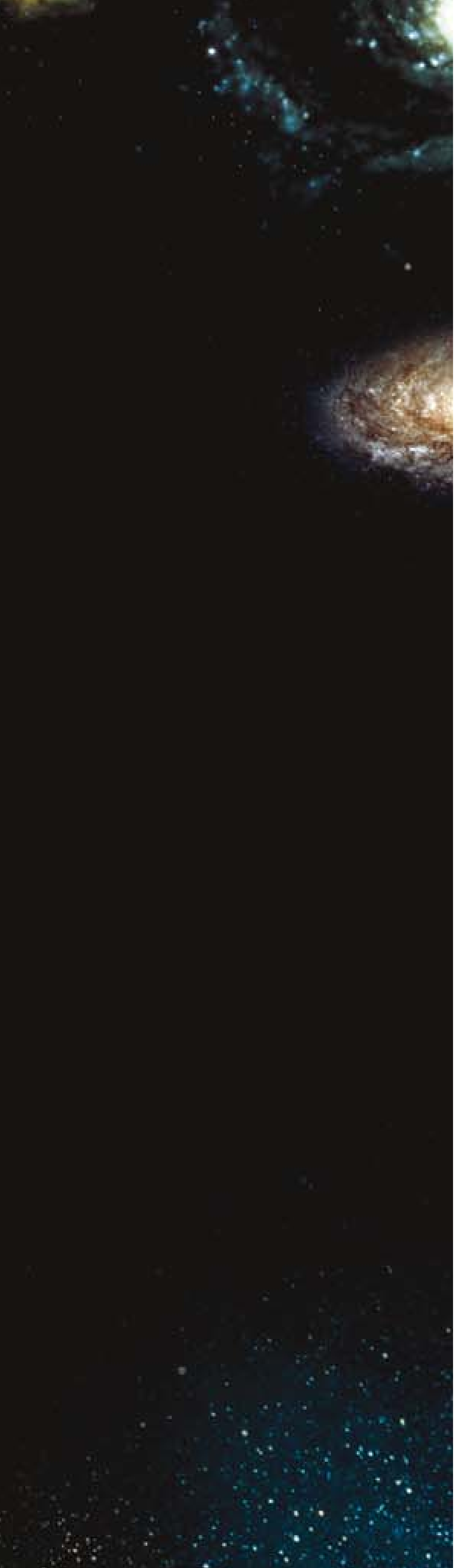
Para inhibir la síntesis de la proteína FANCD2 se ha aplicado la técnica de interferencia por ARN. Se liberan pequeñas moléculas de ARN en el medio celular, que obstruyen la expresión del ARN mensajero que codifica para el gen *FANCD2*. Con ello se impide la síntesis de la proteína correspondiente.

A través de ese método se ha conseguido que las células tumorales tripliquen su sensibilidad ante la quimioterapia, tras reducir en un 50 por ciento la cantidad total de proteína FANCD2. La técnica de interferencia por ARN se ha aplicado en diversos ensayos de tratamiento del cáncer y otros trastornos, sobre todo enfermedades de origen vírico. Algunas de esas aplicaciones se encuentran ya en fase de ensayo clínico. Aunque se trata de una técnica novedosa, la interferencia por ARN ofrece un notable potencial terapéutico y versatilidad.

Se han propuesto estrategias alternativas para bloquear la ruta FA/BRCA. Una de ellas, el uso de inhibidores de FANCD2. Para determinar la actividad de esos inhibidores, se ensayaron miles de sustancias; cuatro de ellas lograron intensificar la sensibilidad de las células al *cis*-platino, lo que las convertía en potenciales fármacos complementarios en el tratamiento quimioterapéutico. Aunque se halla todavía en los albores de su desarrollo, esa nueva estrategia terapéutica ha cosechado resultados alentadores.

Maria Castellà y Jordi Surrallés
Unidad de Genética,
Dpto. Genética y Microbiología,
Universidad Autónoma de Barcelona
y Centro de Investigación Biomédica en Red
de Enfermedades Raras (CIBERER),
Instituto de Salud Carlos III,
Bellaterra, Barcelona

¿El fin de la cosmología?



1. PLANETA SOLITARIO. A medida que el espacio se vacíe debido a la aceleración de la expansión cósmica, la galaxia donde se encuentra la Tierra se irá rodeando de una total oscuridad.

Un universo en aceleración borra las huellas de su propio origen

Lawrence M. Krauss y Robert J. Scherrer

Un artículo de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA que hubiese tratado hace cien años sobre la historia y la estructura a gran escala del universo apenas si habría dicho algo que fuese cierto. En 1908 se creía que nuestra galaxia era todo el universo. La llamaban "el universo isla", como si fuera un cúmulo aislado de estrellas en medio de un vacío infinito. Hoy sabemos que nuestra galaxia es sólo una entre las más de 400.000 millones de galaxias observables. En 1908, el consenso científico admitía que el universo era estático y eterno. No se sospechaba ni remotamente que hubiese nacido de una "gran explosión". Se ignoraba que los elementos ligeros se sintetizaron en los primeros instantes de esa gran explosión y luego en el interior de los núcleos de las estrellas. Nunca se pensó en la expansión del espacio y en que la materia lo curvase. El conocimiento de que el espacio está bañado en radiación, imagen fantasmagórica del frío rescoldo de la creación, tuvo que esperar al desarrollo de técnicas modernas concebidas no para explorar la eternidad, sino para llamar por teléfono a casa.

Es difícil pensar en un área del saber que haya cambiado más en los últimos cien años que la cosmología. Pero, ¿debe la ciencia del futuro reflejar siempre más conocimiento empírico que el que existía en el pasado? Nuestro trabajo reciente sugiere que, a escalas cósmicas, la respuesta es no. Podríamos estar viviendo en la única época de la historia del universo en la que resulta posible adquirir un conocimiento preciso de su verdadera naturaleza.

Un descubrimiento impresionante de hace casi diez años motivó nuestra reflexión. Dos equipos de astrónomos reconstruyeron la ex-

SLIM FILMS

CONCEPTOS BASICOS

- Hace diez años, se produjo un descubrimiento revolucionario: la expansión del universo se está acelerando. Todavía hoy se investiga para determinar las consecuencias.
- La acelerada expansión llegará a hacer que todas las galaxias, salvo las pocas ligadas gravitatoriamente a la nuestra, se nos pierdan de vista para siempre. Quedarán así eliminados los puntos que sirven de referencia para medir la expansión y se diluirán los productos más distintivos de la gran explosión hasta resultar imperceptibles. En resumen, se borrará toda prueba de que un día hubo una gran explosión.
- A nuestros descendientes más lejanos, el universo les parecerá una laguna de estrellas sumergidas en un vacío infinito y sin cambios.
- ¿Cuánta sabiduría ha borrado ya el universo?

pansión del universo a lo largo de los últimos cinco mil millones de años. Vieron que parece acelerarse. Se cree que la fuente de tal antigravedad cósmica es una nueva forma de "energía oscura", asociada al espacio vacío. Algunos teóricos, entre ellos uno de nosotros (Krauss), habíamos anticipado este nuevo resultado a partir de unas mediciones indirectas, pero son las observaciones directas las que cuentan en física.

La aceleración del universo implica que el espacio vacío contiene tres veces más energía que todas las estructuras cósmicas que observamos hoy día: las galaxias, los cúmulos y los supercúmulos de galaxias. Paradójicamente, Albert Einstein fue el primero en plantear la existencia de esta forma de energía, pero con el fin de mantener un universo estático. La llamó constante cosmológica [*véase* "Antigravedad cosmológica", por Lawrence M. Krauss; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1999].

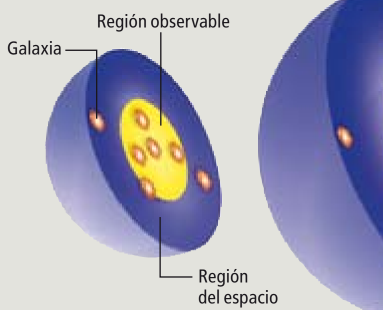
La energía oscura tendrá un impacto enorme en el futuro del universo. Junto con el cosmólogo Glenn Starkman, de la Universidad de la Reserva Case del Oeste, Krauss exploró las consecuencias que esa energía comportará en el destino de la vida. El pronóstico no es bueno. Un universo con una constante cosmológica se convertirá en un lugar muy poco hospitalario. La constante cosmológica produce un "horizonte de sucesos" fijo, una superficie imaginaria, más allá de la cual ni la materia ni la radiación nos pueden alcanzar. El universo se parecerá a un agujero negro vuelto de dentro hacia fuera, donde la materia y la radiación permanecerán atrapadas allende el horizonte, no aquende. Significa que el universo observable contiene sólo una cantidad finita de información; el procesado de la misma (y la vida) no podrán durar para siempre [*véase* "El sino de la vida en el universo", por Lawrence M. Krauss y Glenn D. Starkman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2000].

Mucho antes de que esta limitación de la información se convierta en un problema, la materia en expansión del universo habrá sido conducida fuera del horizonte de sucesos. Estudiaron el proceso Abraham Loeb y Kentaro Nagamine, por entonces en la Universidad de Harvard. Dedujeron que el Grupo Local de Galaxias (la Vía Láctea, Andrómeda y una hueste de galaxias enanas que giran alrededor de ambas) se derrumbará sobre sí mismo para formar un supercúmulo de estrellas solitario e imponente. Las demás galaxias se perderán más allá del horizonte de sucesos. Ocurrirá dentro

SLIM FILMS

EL UNIVERSO CRECE, LAS VISTAS MENGUAN

El universo podría ser infinito. Pero consideremos lo que le ocurre al espacio de nuestro alrededor (*esfera de color púrpura*), del que sólo podemos ver parte (*esfera interior amarilla*). Con la expansión del espacio, las galaxias (*puntos naranjas*) se esparcen. Como a la luz le lleva tiempo propagarse, los observadores terrestres (o nuestros predecesores o descendientes) contemplan un volumen del espacio en continuo crecimiento; las galaxias más distantes acaban alejándose de nosotros a una velocidad que impide que la luz que emitan a partir de ese momento nos llegue jamás. Hace seis mil millones de años, la expansión comenzó a acelerarse.



1 En el comienzo de la aceleración observamos el mayor número de galaxias que jamás podremos ver.

2 La región visible crece, pero el universo en su conjunto crece aún más deprisa, por lo que apreciamos una fracción menor del espacio que hay fuera.

3 Las galaxias lejanas (las que no están ligadas a nosotros por gravedad) se van más allá de nuestro rango de visión. Mientras tanto, la gravedad atrae a las galaxias cercanas.

NOTA: Puesto que el espacio se expande de manera uniforme, cualquier alienígena vería el mismo efecto en otras galaxias.

Los autores

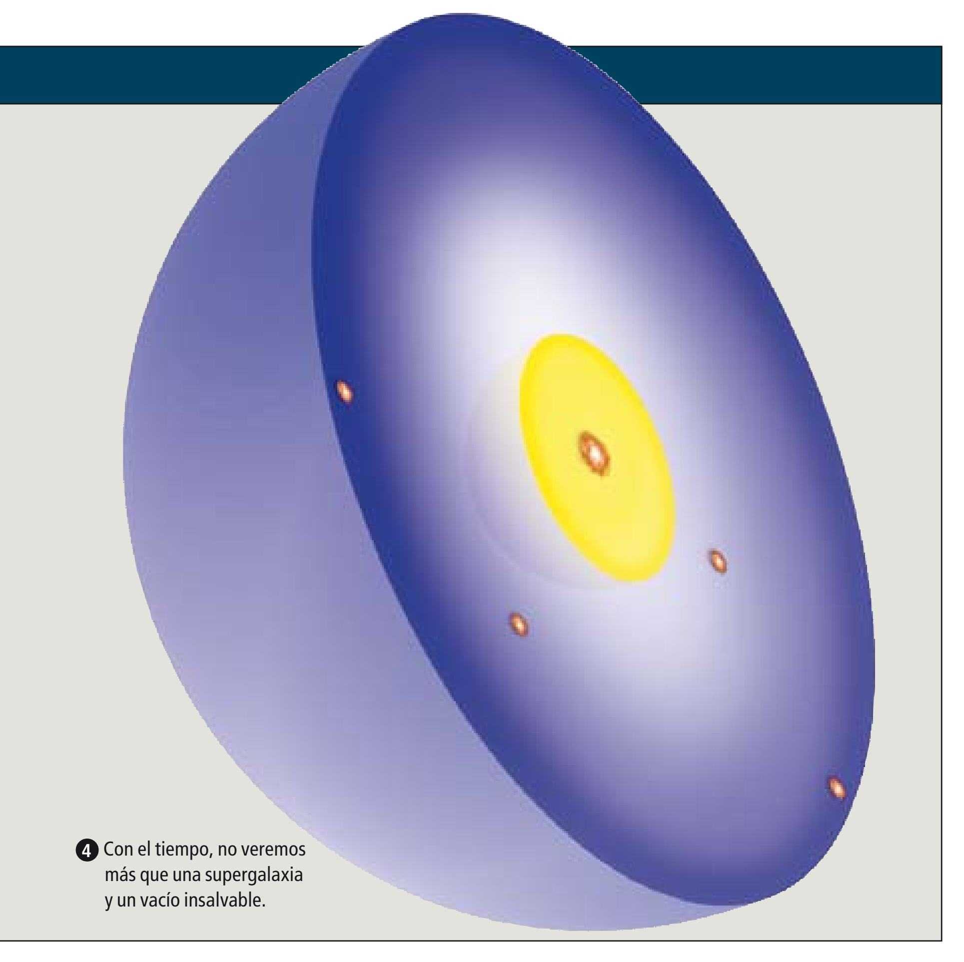
Lawrence M. Krauss y **Robert J. Scherrer** comenzaron a trabajar juntos hace dos años, mientras Krauss pasaba un año sabático en la Universidad Vanderbilt, de Nashville. Krauss, de la Universidad de la Reserva Case del Oeste, dirige el Centro para la Educación e Investigación en Cosmología y Astrofísica. Scherrer es cosmólogo, director del departamento de física y astronomía de Vanderbilt, y autor de relatos de ciencia-ficción.

de unos 100.000 millones de años. Aunque parezca mucho tiempo, no es nada comparado con el desierto de la eternidad.

Pilares que ceden

¿Qué podrían llegar a saber de la historia del universo los astrónomos de un mañana lejano, habitantes en un aislado supercúmulo de estrellas? Para abordar la cuestión, recordemos los pilares sobre los que descansa nuestro conocimiento de la gran explosión.

El primero es la teoría de la relatividad general de Einstein. Durante casi 300 años, la teoría de Newton de la gravitación universal sirvió de cimiento para la astronomía. La teoría de Newton predice muy bien los movimientos de los objetos a escalas terrestres y galácticas, pero es incapaz de lidiar con cantidades infinitas de materia. La relatividad general triunfa sobre esta limitación. Poco después de que Einstein publicara la teoría en 1916, Willem de Sitter resolvió las ecuaciones de la relatividad general para un universo simplificado que incorporaba la constante cosmológica de Einstein. El trabajo de De Sitter parecía reproducir la percepción del universo que se tenía entonces: una "isla" galáctica sumergida en un gigantesco vacío estático.



4 Con el tiempo, no veremos más que una supergalaxia y un vacío insalvable.

Los cosmólogos se percataron enseguida de que la estática era una mala interpretación. El universo de De Sitter estaba en eterna expansión. Tal y como Georges Lemaître aclaró más tarde, las ecuaciones de Einstein predicen que un universo estático, infinito y homogéneo es imposible. El universo se ha de expandir o contraer. De ese enfoque nació la que más tarde se denominaría teoría de la gran explosión.

El pilar siguiente se colocó en los años veinte del siglo pasado, al descubrirse la expansión del universo. El primero en obtener datos relativos a la expansión fue Vesto Slipher, quien se valió de los espectros de las estrellas para medir las velocidades de las galaxias cercanas. Las ondas de la luz procedentes de una estrella que se acerca a la Tierra se comprimen, acortando la longitud de onda y haciendo que la luz sea más azul. Las ondas de la luz de un objeto que se aleja de nosotros se estiran, con lo que la longitud de onda es mayor y la luz más roja. Slipher determinó si las estrellas se mueven hacia nosotros o se alejan y a qué velocidad midiendo el alargamiento o la compresión de la luz procedente de galaxias distantes. (En aquel momento, los astrónomos todavía no estaban seguros de que las manchas luminosas que hoy llamamos "galaxias" fueran cuerpos independientes de estrellas, y no meras nubes de gas situadas dentro de nuestra propia galaxia.) Slipher halló que casi todas las galaxias se alejaban de nosotros. Parecía que estábamos sentados en el centro de una descontrolada expansión.

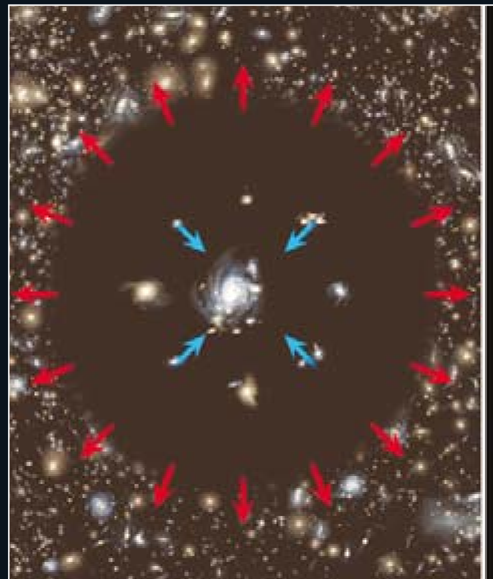
No obstante, el crédito por haber descubierto la expansión del universo no se le concede a Slipher, sino a Edwin Hubble, quien no sólo midió la velocidad de las galaxias cercanas, sino también las distancias a que se encontraban. Sus mediciones condujeron a dos conclusiones que justifican su fama. Primero, Hubble comprobó que las galaxias se hallan tan lejos, que forman en verdad conjuntos autónomos de estrellas, igual que nuestra propia galaxia.

Segundo, descubrió una sencilla relación entre la distancia de las galaxias y sus velocidades. La velocidad es directamente proporcional a la distancia: una galaxia dos veces más lejana que otra se mueve dos veces más deprisa. Esta relación entre la distancia y la velocidad es precisamente la que corresponde a un universo que se expande. Las mediciones de Hubble se han refinado desde entonces; últimamente, por medio de la observación de supernovas lejanas. El resultado ha sido el descubrimiento de la energía oscura.

El tercer pilar es la débil radiación del fondo de microondas, descubierta accidentalmente en 1965 por dos físicos de los laboratorios

EL APOCALIPSIS DE CONOCIMIENTO

La aceleración de la expansión cósmica del universo ha empezado ya a minar los tres pilares observacionales de la teoría de la gran explosión: el alejamiento mutuo de las galaxias, la radiación del fondo cósmico de microondas y las cantidades relativas de elementos químicos ligeros, como el hidrógeno y el helio.





HOY, los tres pilares son muy perceptibles. Observamos que las galaxias distantes se alejan de nosotros (*flechas rojas*), mientras que las cercanas se reagrupan (*azul*); la radiación de fondo baña todo el espacio; y el gas cósmico aún conserva la mezcla química producida al principio de la gran explosión.

DENTRO DE MILES DE MILLONES DE AÑOS, las galaxias cercanas se habrán fusionado y las más lejanas habrán escapado a nuestra vista. La radiación de fondo se habrá diluido hasta niveles indetectables. Las múltiples generaciones de estrellas habrán contaminado la mezcla química original.

DON DIXON

AMNESIA COSMICA

La actual aceleración de la expansión cósmica no es la única manera en la que el universo destruye la información sobre su pasado.

INFLACION COSMICA
Es posible que la expansión también se acelerara muy pronto en la historia cósmica. Habría borrado casi todos los restos de un universo anterior, incluyendo lo que sucediese en la propia gran explosión.

AGUJEROS NEGROS
Estos sumideros cósmicos no sólo se tragan los objetos, sino la información que guardan, que se pierde para siempre.

MEDICIONES CUANTICAS
Cuando se mide un sistema cuántico, adquiere un estado determinado y se borran las muchas combinaciones posibles que ese sistema podría haber tenido.

Bell, Arno Penzias y Robert Wilson, mientras rastreaban fuentes de interferencias de radio. Pronto se estableció que esa radiación constituía una reliquia de las primeras fases de la expansión del universo. La radiación de fondo manifiesta que el universo comenzó siendo caliente y denso, para ir enfriándose y diluyendo desde entonces.

El último pilar observacional de la gran explosión es la idoneidad de un universo primitivo caliente y denso para la fusión nuclear. Cuando el universo alcanzó una temperatura de entre mil millones y diez mil millones de kelvin, los núcleos más ligeros se fundieron en núcleos más pesados: la nucleosíntesis de la gran explosión. Tal proceso sólo puede ocurrir durante unos pocos minutos mientras el universo se expande y se enfría; la fusión, por ello, no pasó de los elementos más ligeros. La mayor parte del helio del universo se produjo en esos minutos, así como del deuterio o hidrógeno pesado. Las cantidades relativas de helio y deuterio coinciden con las predicciones de la nucleosíntesis de la gran explosión, un sólido respaldo para la teoría, al tiempo que proporciona una estimación precisa de la cantidad de protones y neutrones en el universo.

Cielos oscuros

¿Qué verán los científicos cuando miren al cielo dentro de 100.000 millones de años? Sin telescopios, percibirán lo mismo que hoy: las estrellas de nuestra galaxia. Las estrellas más brillantes y de mayor masa habrán consumido todo su combustible nuclear, pero aún brillarán en la noche muchas estrellas más pequeñas. Habrá una verdadera diferencia cuando construyan telescopios que puedan observar otras galaxias. ¡No verán ninguna! Las galaxias próximas se habrán fundido con la Vía Láctea; entre todas integrarán una galaxia solitaria y enorme. Las demás habrán desaparecido hace tiempo allende el horizonte de sucesos.

La desaparición de las galaxias no será inmediata, sino gradual. Su corrimiento al rojo se irá haciendo infinitamente mayor a medida que se aproximen al horizonte. Krauss y Starkman calcularon que superará el valor de 5000 en todas las galaxias dentro de cien mil millones de años y llegará a 10^{53} a los 10 billones de años; para entonces, los rayos cósmicos de muy alta energía tendrán un corrimiento al rojo tan elevado, que su longitud de onda superará el tamaño del hori-

zonte. Estos objetos serán, sin duda, invisibles para el hombre.

Como resultado, el descubrimiento crucial de Hubble de la expansión del universo será irreproducible. La materia en expansión habrá desaparecido detrás del horizonte y lo que quede pertenecerá a un cúmulo de estrellas ligado por gravedad. Para los astrónomos del futuro, el universo observable se asemejará bastante al "universo isla" de 1908: un conjunto de estrellas, único, enorme, estático y eterno, rodeado por un espacio vacío.

La experiencia nos dice que a pesar de disponer de datos, el modelo cosmológico correcto no siempre resulta obvio. Recuérdese que algunos astrofísicos recuperaron entre 1940 y 1960 la idea de un universo eterno. El edificio de la cosmología observacional se apoyaba por entonces sólo en el descubrimiento de Hubble de la expansión del universo. El universo se encontraba, decían, en un estado de continuo equilibrio. Se creaba materia mientras proseguía la expansión; por lo tanto, el universo, como un todo, no cambiaba con el tiempo. Esta idea, que acabó en un callejón sin salida intelectual, pone de manifiesto la clase de nociones equivocadas que pueden surgir cuando no hay datos observacionales adecuados.

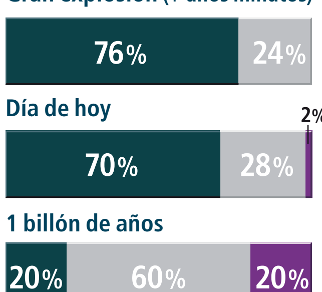
¿Dónde más podrían buscar los astrónomos del futuro pruebas de la gran explosión? ¿Les permitiría la radiación del fondo de microondas examinar la dinámica del universo? No. Con la expansión del universo las longitudes de onda de la radiación de fondo se estiran también y la radiación se vuelve más difusa. A la edad de cien mil millones de años, las longitudes de onda más intensas del fondo tendrán una escala de un metro, correspondiente a las radioondas y no a las microondas. La intensidad de la radiación habrá caído a una billonésima parte; podría dejar de observarse para siempre.

Más lejos en el tiempo, el fondo cósmico llegará a ser completamente indetectable. El espacio entre las estrellas de nuestra galaxia se halla ocupado por un gas ionizado de electrones. Las radioondas de baja frecuencia no pueden penetrar en este gas; son absorbidas o reflejadas. Un efecto parecido constituye la razón de que se sintonicen de noche frecuencias de radio de AM lejos de las ciudades de origen: las radioondas se reflejan en la ionosfera y son devueltas a la superficie. El medio interestelar viene a ser una gran ionosfera que impregna la galaxia. Una radioonda de menos de un kilohertz de frecuencia (una longitud de onda superior a los 300 kilómetros) no puede entrar en nuestra galaxia. No cabe en la Vía Láctea una radioastronomía por debajo del kilohertz. Cuando el universo alcance una edad 25 veces superior a la actual, el fondo de microondas se habrá dilatado por encima de esta longitud de onda y será indetectable para los residentes de la galaxia. Antes incluso, las débiles estructuras de esta radiación de fondo, que tanta información han proporcionado a los cosmólogos del presente, se habrán silenciado para los investigadores.

PERDIDA DE LOS INDICIOS QUIMICOS

El universo contiene sobre todo hidrógeno y helio producidos en los tres primeros minutos de la gran explosión. Las estrellas han convertido parte del hidrógeno en helio, si bien en un porcentaje pequeño. Las cantidades relativas de estos elementos representan una prueba observacional crucial para la teoría de la gran explosión. En el futuro, con la continua producción estelar de nuevo material, no será así.

■ Hidrógeno □ Helio
■ Elementos más pesados que el helio



LISA APFELBACHER

Ardiendo

¿Permitiría la medición de las cantidades relativas ("abundancias") de los elementos químicos conocer la gran explosión a los cosmólogos del futuro? Una vez más, la respuesta es negativa. Podemos analizar la nucleosíntesis de la gran explosión porque las concentraciones de deuterio y helio no han evolucionado mucho desde que se crearon sus núcleos, hace catorce mil millones de años. Aunque el helio se fabrica en las estrellas en el curso de las reacciones de fusión nuclear, su concentración ha aumentado sólo en un porcentaje pequeño. Según los astrónomos Fred Adams y Gregory Laughlin, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, esa fracción podría crecer hasta un 60 por ciento tras muchas generaciones de estrellas. Un observador de un futuro distante encontraría que el helio producido por generaciones sucesivas de estrellas abundaría mucho más que el helio primordial.

Hoy día, la prueba más limpia de la nucleosíntesis de la gran explosión la proporciona la cantidad relativa de deuterio. Nuestras mejores mediciones de la concentración de deuterio primordial proceden de las observaciones de las nubes de hidrógeno iluminadas, desde atrás, por cuásares, faros muy lejanos y brillantes posiblemente encendidos por los agujeros negros. En el futuro lejano, lo mismo las nubes de gas que los cuásares habrán atravesado el horizonte de sucesos y se habrán perdido de vista para siempre. Sólo se observará el deuterio de la galaxia. Pero las estrellas destruyen el deuterio; apenas sobrevive una pequeña cantidad. Aun cuando los astrónomos del futuro observaran deuterio, no lo relacionarían con la gran explosión. Las reacciones nucleares en las que intervienen rayos cósmicos de alta energía, estudiadas hoy como posible fuente de parte del deuterio observado, les parecerán un origen más verosímil.

Aunque las cantidades relativas de los elementos ligeros no proporcionarán una prueba directa de una gran explosión caliente, sí harán que la cosmología del futuro difiera de la cosmología ilusoria de un siglo. Astrónomos y físicos que sepan de física nuclear deducirán que las estrellas consumen material nuclear.

FUNDIDO EN NEGRO





LA BANDA DIFUSA que cruza el cielo es el disco de la Vía Láctea. Unas pocas galaxias cercanas, como Andrómeda y las Nubes de Magallanes, son perceptibles a simple vista. Los telescopios revelan la existencia de miles de millones de galaxias más.

ANDROMEDA se ha ido moviendo hacia nosotros y ahora llena el cielo. El Sol ha evolucionado hacia la fase de gigante roja para después agotarse y dejar a la Tierra sumida en una existencia desolada.

DON DIXON

HITOS COSMICOS

10^{-30} segundos
La inflación cósmica

100 segundos
Se crean el deuterio y el helio

400.000 años
Se libera la radiación de microondas

Ocho mil millones de años
La expansión comienza a acelerarse

13.700.000.000 años
Hoy día

Veinte mil millones de años
La Vía Láctea y Andrómeda colisionarán

100.000 millones de años
Las demás galaxias se harán invisibles

1 billón de años
Los isótopos primordiales se habrán perdido o se diluirán

100 billones de años
La última estrella se agota

Si supusiesen además, incorrectamente, que todo el helio observado fue producido por generaciones anteriores de estrellas, podrían poner un límite superior a la edad del universo. Llegarían a la conclusión de que su universo galáctico no es eterno, que su edad es finita. Sin embargo, el origen de la materia que estarían viendo seguiría siéndoles desconocido.

¿Y la idea con la que empezaba este artículo, que la teoría de la relatividad de Einstein predice un universo en expansión y, por tanto, una gran explosión? Los habitantes del universo en un futuro lejano deberían hallarse capacitados para descubrir la teoría de la relatividad general a partir de mediciones precisas de la gravedad de su propio sistema solar. El uso de esta teoría para inferir la gran explosión, no obstante, descansa en las observaciones de la macroestructura del universo. La teoría de Einstein predice un universo en expansión sólo si el universo es homogéneo. El universo que nuestros descendientes explorarán será de todo menos homogéneo. Consistirá en una isla de estrellas sumergida en una vasta oscuridad. Se parecerá al universo isla de De Sitter. El futuro último que le aguarda al universo observable es derrumbarse sobre sí mismo hasta convertirse en un agujero negro. Lo que le sucederá a nuestra galaxia en un futuro lejano.

Solos en la nada

¿No habrá forma de que nuestros descendientes perciban la expansión del universo? Más acá del horizonte de sucesos, un fenómeno seguirá delatando la aceleración, al menos según entendemos ahora la relatividad general. Al igual que el horizonte de sucesos de un agujero negro, el horizonte cosmológico de sucesos también emite radiación. Pero la temperatura asociada a esta radiación es inmensurablemente pequeña, unos 10^{-30} kelvin. Aunque los astrónomos lograran detectarla, la atribuirían, quizás, a cualquier otra fuente mayor de ruido.

Los futuros observadores, si fuesen ambiciosos, lanzarían sondas para que escaparan de la supergalaxia y sirvieran de puntos de referencia de la expansión cósmica. Que se les ocurriese hacer tal cosa parece improbable. Ahora bien, incluso en el caso de que lo hiciesen, se necesitarían miles de millones de años, por lo menos, para que una sonda alcanzara un punto donde la expansión perturbase su velocidad notablemente: además, la sonda debería tener



LA SUCESORA de la Vía Láctea es una supergalaxia en forma de bola. La Tierra podría flotar, abandonada, por sus aledaños. Las demás galaxias no están al alcance de la vista.

LAS LUCES SE APAGAN. Las últimas estrellas se agotan. Aparte de algunos agujeros negros, que brillarán débilmente, y de las luces artificiales que alguna civilización encendiese, el universo queda a oscuras. La galaxia se derrumbará sobre sí misma y se convertirá en un agujero negro.

una energía equiparable a la de una estrella para comunicarse con sus creadores desde una distancia tan inmensa.

Por tanto, los observadores del futuro quizá predigan que el universo acabará con una gran contracción local; ignorarán la expansión eterna que se deriva de la constante cosmológica. Su universo no se iría extinguiendo; terminaría en una catástrofe.

Todo esto nos conduce inexorablemente a una conclusión muy peculiar. El intervalo en el que unos observadores inteligentes pueden deducir la verdadera naturaleza del universo en expansión tal vez sea muy corto. Algunas civilizaciones podrían basarse en archivos históricos antiguos; este mismo artículo podría formar parte de ese archivo, si es que sobrevive a miles de millones de años de guerras, supernovas, agujeros negros y otros incontables peligros. Que les resulten creíbles es otra cuestión. Las civilizaciones que carezcan de ese tipo de archivos estarán condenadas a permanecer por siempre ignorantes de la gran explosión.

¿Por qué es el universo tan especial en el presente? Muchos opinan que la existencia de la vida proporciona un efecto de selección que explicaría las coincidencias asociadas con el momento actual [*véase* “El principio antrópico”, por George Gale; Investigación y Ciencia, febrero de 1982]. Nuestra reflexión nos conduce a una enseñanza diferente.

Primero, cabe que ésta no sea la primera vez que la información del universo se pierde a causa de la expansión acelerada. Si, muy al principio, el universo pasó por un período de inflación, la rápida expansión de aquella era borró del universo hoy observable casi todos los detalles de la materia y la energía preexistentes. Sin duda, una de las motivaciones iniciales de los modelos inflacionarios era liberar el universo de objetos cosmológicos problemáticos, por ejemplo los monopolos magnéticos, que quizás abundaron en el pasado.

Y una lección más importante. Si bien somos afortunados por vivir en un momento en el que ha sido posible dar con los pilares de la gran explosión, cabe imaginar que otros aspectos fundamentales del universo han dejado de poder observarse. ¿Qué nos hemos perdido? Más que sentirnos orgullosos, deberíamos ser humildes. Quizás algún día descubramos que es mucho lo que ignoramos del universo actual, que tan bien creemos conocer.

Bibliografía complementaria

LIFE, THE UNIVERSE AND NOTHING: LIFE AND DEATH IN AN EVER-EXPANDING UNIVERSE. Lawrence Krauss y Glenn Starkman en *Astrophysical Journal*, vol. 531, n.º 22, págs 22-30; marzo 2000.

THE FIVE AGES OF THE UNIVERSE: INSIDE THE PHYSICS OF ETERNITY. Fred C. Adams y Greg Laughlin. Free Press, 2000.

ATOM: A SINGLE OXYGEN ATOM’S JOURNEY FROM THE BIG BANG TO LIFE ON EARTH ... AND BEYOND. Lawrence M. Krauss. Back Bay Books, 2002.

THE RETURN OF A STATIC UNIVERSE AND THE END OF COSMOLOGY. Lawrence M. Krauss y Robert J. Scherrer en *Journal of General Relativity and Gravitation*, vol. 39, n.º 10, págs. 1545-1550; octubre 2007.


GUERRA ESPACIAL
¿PROXIMAMENTE EN LAS MEJORES ORBITAS?

1. EL CONCEPTO DE ARMA ESPACIAL comprende toda una variedad de destructores de satélites —proyectiles, armas de láser y de microondas—, así como armas lanzadas desde el espacio contra objetivos en tierra, tales como los revienta-búnkeres de tungsteno apodados "barras de Dios".

Un reciente cambio en la estrategia militar de EE.UU. y determinadas actuaciones chinas amenazan con iniciar una nueva carrera de armamentos espacial. Pero, ¿beneficiaría a algún país instalar armas en el espacio?

Theresa Hitchens

En la guerra, no hay que atacar en contrapendiente a un enemigo que ocupe las alturas. No hay que trabar combate cuando cargue partiendo de las alturas. Atráigasele al combate en terreno llano.

—Sunzi, estratega militar chino
Arte de la guerra, circa 500 a.C.

Desde la Antigüedad, adueñarse de las alturas y conservarlas forma parte de las doctrinas militares clásicas. No nos extrañe, pues, que, ahora que los seres humanos y sus máquinas han irrumpido en el espacio ultraterrestre, los jefes militares consideren las órbitas terrestres cruciales para la actividad guerrera. Pero hasta hace poco se había mantenido como norma no armar el espacio, pese a que no hubiera tratados ni leyes internacionales que explícitamente prohibieran poner en órbita sistemas o armas no nucleares antisatélite. Los países en su mayoría rechazaban tales armas, por el temor a la posibilidad de desestabilizar el equilibrio global de poderes con una costosa carrera de armamentos espaciales.

Ese consenso corre ahora peligro de deshacerse. En octubre de 2006, la administración Bush adoptó una nueva Política Nacional para el Espacio, formulada un tanto vagamente, que reivindica para EE.UU. el derecho a ejercer el "control del espacio" y rechaza "los nuevos regímenes legales u otras restricciones que pretendan prohibir o limitar el acceso o el uso del espacio por parte de Estados Unidos".

Tres meses después, la República Popular China conmocionó al mundo abatiendo uno de sus propios satélites meteorológicos Fengyun, que van estando ya caducos, acto que dio por resultado una granizada de peligrosa basura espacial y un diluvio de protestas internacionales, por no hablar de los chorros de tinta vertidos en los círculos políticos y militares estadounidenses. El lanzamiento fue la primera prueba en más de dos decenios de un arma específicamente antisatélite. China es el tercer país que exhibe un arma de ese tipo, tras EE.UU. y la Federación Rusa. Se preguntaron muchos observadores si la prueba no sería el primer paso de una era de guerra espacial en ciernes.

Sostienen los críticos que no está claro en absoluto que desarrollando los medios para una guerra espacial se refuerce la seguridad de un país. Después de todo, los satélites e incluso las armas orbitales son, por su propia naturaleza, fáciles de localizar y rastrear, y es probable que persistan vulnerables a un ataque, cualesquiera que sean las defensas que se monten para protegerlos. Además, desarrollar unos sistemas antisatélite desembocaría a buen seguro en una carrera de armamentos, enormemente cara y potencialmente desbocada, conforme otros países concluyeran que ellos, también, debían entrar en liza.

Los propios ensayos de los medios necesarios para librar batallas en el espacio —por no decir nada de una verdadera batalla— generarían unas enormes cantidades de restos que seguirían orbitando alrededor de la Tierra. Los impactos de esa basura espacial contra satélites y vehículos espaciales tripulados a unas velocidades de varios kilómetros por segundo amenazarían las telecomunicaciones por satélite, las predicciones meteorológicas, la navegación de precisión, e incluso el mando y control militar. Podrían devolver la economía mundial al decenio de los cincuenta del siglo pasado.

CONCEPTOS BASICOS

- Aunque las "alturas" del espacio parecen ofrecer unas claras ventajas militares, los gobiernos se han venido resistiendo a instalar armas en órbita terrestre. Esa estrategia prudente podría estar cambiando.
- La Política Nacional para el Espacio adoptada por EE.UU. en 2006 parecía abrir el camino a una ulterior militarización del espacio. Poco después, China ensayaba un misil antisatélite lanzado desde tierra.
- Pero el armamento espacial podría desencadenar una costosa carrera armamentística internacional. Los satélites y las armas espaciales seguirán siendo vulnerables, cualesquiera que sean las defensas que se provean.
- Y la actividad bélica en el espacio, o incluso las pruebas "en vivo" de las armas, podrían originar tal cantidad de basura espacial, que las órbitas terrestres se volverían intransitables para los satélites civiles y las naves espaciales tripuladas.

ILUSTRACIONES DE KENN BROWN

La vuelta de "La guerra de las galaxias"

Desde el alba de la era espacial, los planificadores de defensa vienen dándole vueltas a las armas antisatélite y a las emplazadas en el espacio, con miras a aprovechar las ventajas militares de la cota alta por antonomasia. Acaso el esfuerzo más destacado fuera la Iniciativa de Defensa Estratégica, IDE, del presidente Reagan, burlonamente llamada "Guerra de las Galaxias" por sus críticos. La estrategia militar estadounidense no ha adoptado hasta ahora armas de ese tipo.

Suele definirse a las armas espaciales como sistemas destructivos que operan en el espacio ultraterrestre estacionadas en órbita o tras haber sido lanzadas directamente desde tierra. La categoría incluye las armas antisatélite; los sistemas de láser en los que se combinan láseres basados en tierra con espejos instalados en dirigibles o en satélites para reflejar un haz láser más allá del horizonte terrestre; y las plataformas orbitales que dispararían proyectiles o haces energéticos desde el espacio. (Es importante señalar que todos los países evitarían, sin duda, el empleo de un cuarto tipo de arma antisatélite, las explosiones nucleares a gran altitud. El impulso electromagnético y la nube de partículas fuertemente cargadas procedentes de una detonación de esa naturaleza inutilizaría o destruiría casi todos los satélites y vehículos espaciales tripulados en órbita [*véase* "Explosiones nucleares en órbita", por Daniel G. Dupont; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2004].)

Pero cualquier cosa que se diga sobre armas espaciales tropezará con una réplica política. No hace mucho, algunos de sus partidarios trataron de ampliar la lista que acabo de exponer para incluir dos técnicas ya existentes, que implican atravesar el espacio: los misiles balísticos intercontinentales (ICBM) y los sistemas de guerra electrónica basados en tierra. Su existencia, así se aduce, quita sentido a toda consideración sobre si deben construirse o no sistemas de armas espaciales. Según la definición revisada, ya existen "armas espaciales". Pero, cualquiera que sea el significado exacto de la expresión "armas espaciales", las cuestiones que éstas suscitan tienen poco de nuevo para los grupos de expertos y los círculos de Washington ligados a la planificación militar. ¿Es deseable, es siquiera viable, incorporar a la estrategia militar de Estados Unidos armas antisatélite y armas disparadas en órbita?

La nueva Política Nacional para el Espacio, combinada con el ensayo chino, apremia el debate entre bastidores. Numerosos jefes militares norteamericanos expresaron su alarma tras el ensayo de los chinos. Les preocupaba que China, en un conflicto por Taiwán, pudiera amenazar a los satélites estadounidenses en órbita terrestre baja. En abril de 2007, Michael Moseley, jefe del estado mayor de la Fuerza Aérea de EE.UU., comparó la prueba antisatélite china con el lanzamiento del Sputnik soviético en 1957, que intensificó singularmente la carrera de armas durante la guerra fría. Moseley reveló también que el Pentágono había empezado a revisar las defensas de los satélites del país; el espacio ultraterrestre es ahora, afirmó, un "terreno en disputa".

En el Congreso, las reacciones fueron las predecibles. Los "halcones de China", conservadores como el senador por Arizona Jon Kyl, reclamaron enseguida el desarrollo de armas antisatélite e interceptores estacionados en el espacio para contrarrestar la capacidad china. Mientras tanto, políticos más moderados, entre ellos el miembro por Massachusetts de la Cámara de Representantes Edward Markey, instaron a la administración Bush a iniciar negociaciones al objeto de prohibir todas las armas espaciales.

INTERCEPTORES CINETICOS

VIABILIDAD: Alta

PRESUPUESTOS ESTIMADOS (dólares)*:

- **Interceptor cinético con base en tierra (adaptación del programa existente de defensa contra misiles balísticos): 0-3000 millones**
- **Interceptor cinético lanzado desde el aire: 3000 millones**

Aparte de perturbar las radiocomunicaciones o atacar las estaciones de control en tierra, posiblemente el modo más simple de inutilizar un satélite sea lanzar una carga útil a bordo de un misil para que colisione con el blanco orbital. Los misiles de alcance medio con que cuentan una docena de países pueden alcanzar las órbitas terrestres bajas (de 100 a 2000 kilómetros). Los satélites que se hallen en esas órbitas pueden ser atacados por pequeños vehículos destructores lanzados desde el aire. El asalto a un objetivo en las más altas órbitas geoestacionarias (unos 36.000 kilómetros) requiere un motor de lanzamiento mucho más potente, que hoy sólo poseen ocho países y consorcios espaciales. Pero la auténtica dificultad técnica consiste en guiar y maniobrar, con la precisión necesaria, el vehículo destructor hacia su blanco.



**Las estimaciones suelen incluir el desarrollo y los gastos de adquisición asociados a la construcción del sistema y a su mantenimiento en servicio durante 20 años.*

FUENTE: Aiming the Heavens: A preliminary Assessment of the Potential Cost and Cost-Effectiveness of Space-Based Weapons, *por Steven Kosiak. Centro de Estimaciones Estratégicas y Presupuestarias.*

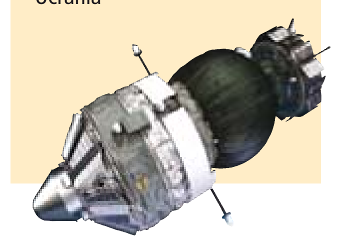
LOS ACTORES

Desde los inicios de la era espacial, ha incrementado la lista de países, entidades multinacionales y consorcios privados que se han mostrado capaces de poner satélites en órbita y, por tanto, en potencia, de derribar uno de ellos. La principal preocupación entre los observadores es que todo esfuerzo de EE.UU. por desarrollar armas orbitales impulsaría a la República Popular China, la Federación Rusa y otros a sumarse a una costosa carrera de armas en el espacio.

CON ARMAS ANTISATELITE BASADAS EN TIERRA DEMOSTRADAS
China, Rusia, EE.UU.

CON CAPACIDAD PARA LLEGAR A ORBITAS GEOESTACIONARIAS (36.000 km de altitud)
Agencia Espacial Europea (Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza), Francia, *International Launch Services* —Servicios Internacionales de Lanzamientos— (Rusia, EE.UU.), Japón, *Sea Lunch* —Lanzamientos desde el Mar— (Noruega, Rusia, EE.UU., Ucrania)

CON CAPACIDAD PARA LLEGAR SOLO A ORBITAS TERRESTRES BAJAS (entre 100 y 2000 km de altitud)
India, Israel, Pakistán, Ucrania



ESA

El juego de las potencias

Quizá sea aún más inquietante que otros países, incluido el rival regional de China, la India, pudieran sentirse impulsados a conseguir en el espacio capacidades no sólo defensivas, sino también ofensivas. A este respecto, el semanario estadounidense *Defense News* citaba la declaración de responsables indios de defensa, que mantenían oculta su identidad: su país había empezado ya a desarrollar sus propias armas antisatélite de energía cinética (no explosivas, sino de destrucción por impacto) y laséricas.

Si la India emprende ese camino, su archienemigo Pakistán seguirá el ejemplo. Como la India, Pakistán dispone de un programa de misiles balísticos avanzado, que incluye misiles balísticos de alcance medio capaces de lanzar un sistema antisatélite. El propio Japón, la tercera potencia asiática, podría unirse a tal carrera espacial. En junio de 2007 la Dieta nipona empezó a considerar un programa respaldado por el gobierno de Fukuda que permitiría el desarrollo de satélites para propósitos "militares y de seguridad nacional".

En cuanto a Rusia, tras la prueba de los chinos reiteró su postura contra la armamentización del espacio. Pero, a la vez, no quiso criticar los actos de Pekín y en cambio culpó a EE.UU. Los esfuerzos norteamericanos para construir un sistema defensivo con misiles, acusó Putin, y los cada vez más agresivos planes de Estados Unidos de instalarse militarmente en el espacio estaban provocando las reacciones de China. Sin embargo, Rusia misma, como gran potencia presente en el espacio que ha incorporado satélites a su estructura de defensa nacional, se vería en apuros para eludir su entrada en una carrera de armas en el espacio.

Dada la proliferación de agencias espaciales, los partidarios de una estrategia decidida de guerra espacial opinan que resulta inevitable la presencia de armas en el firmamento y que lo mejor para EE.UU. es llegar allí los primeros y bien armados. Las armas antisatélite y las estacionadas en el espacio, aducen, serán necesarias no sólo para defender los satélites comerciales y militares estadounidenses, sino también para negar a cualquier adversario el uso del espacio con el fin de mejorar la operatividad de sus fuerzas en el campo de batalla.

Ahora bien, toda carrera armamentística en el espacio desestabilizaría casi con toda seguridad el equilibrio de las potencias, multiplicando así los riesgos de conflicto global. En una competición tan apresurada —en el espacio o donde sea—, a duras penas podría mantenerse el equilibrio. Y aunque las primeras potencias lograsen una situación de estabilidad,

no estaría garantizado que ambos bandos lo percibieran de ese modo. En cuanto uno de ellos creyera que perdía posiciones respecto al otro, se sentiría tentado a lanzar un ataque preventivo, antes de que empeorasen las cosas todavía más. Irónicamente, lo mismo valdría para el bando que creyera haber logrado una ventaja. En este caso, experimentaría una fuerte tentación de atacar primero, antes de que se recuperase el adversario. Por último, una carrera de armamentos espacial incrementaría el riesgo de que un mero error técnico desatara las hostilidades. En el vacío lejano costaría mucho distinguir con nitidez un acto intencionado de otro accidental.

Interceptores de impacto directo

Según estimaciones de responsables de las fuerzas armadas y de la inteligencia de EE.UU., y también de expertos independientes, los chinos debieron de destruir su satélite meteorológico con un vehículo de energía cinética propulsado por un misil balístico de dos etapas de alcance medio. En principio, tales armas antisatélite de ascenso directo constituyen el procedimiento más sencillo para eliminar satélites. Unos doce países y consorcios pueden llegar a las órbitas terrestres bajas (entre 100 y 2000 kilómetros de altura, más o menos) con misiles de alcance medio; ocho de esos países pueden alcanzar las órbitas geoestacionarias (a unos 36.000 kilómetros de la Tierra).

Pero la auténtica dificultad técnica de los vehículos destructores por impacto no está en la capacidad de lanzamiento, sino en las técnicas de maniobra y guiado de precisión necesarias para dirigir el vehículo hasta el blanco. Hasta qué punto domina China esas técnicas no está muy claro. Dado que el satélite meteorológico seguía en servicio cuando fue destruido, los operadores chinos debían de conocer su posición exacta en cada instante.

Láseres con base en tierra

El ensayo del ingenio antisatélite chino de ascensión directa siguió casi inmediatamente a unas noticias de septiembre de 2006, según las cuales los chinos habrían conseguido "pintar" —iluminar— los satélites espía norteamericanos con un láser de base en tierra. ¿Trataba realmente Pekín de "cegar" los satélites o dañarlos de alguna otra manera? No se sabe. En Washington no parece que haya consenso acerca de las intenciones chinas. Quizá China simplemente estaba probando qué tal iban sus estaciones de seguimiento por láser de baja potencia con las plataformas norteamericanas de observación orbital.

Aun así, la prueba constituyó una provocación. No siempre hay que "freír" electrónicamente un satélite para dejarlo fuera de servicio. La prueba del sistema MIRACL ("MidInfraRed Advanced Chemical Laser", láser químico avanzado del infrarrojo medio) que el ejército de Estados Unidos efectuó en 1997 mostró que los satélites diseñados para recoger imágenes ópticas pueden quedar temporalmente inutilizados —saturados— por haces de baja potencia. Los espías orbitales se cuentan entre los satélites vulnerables a esos ataques.

En los años setenta, EE.UU. y la ex Unión Soviética iniciaron la experimentación con armas láser antisatélite. Los expertos de ambos países se centraron en los numerosos problemas implicados en la construcción de unos sistemas de láser de alta potencia que tuvieran una capacidad fiable de destruir, desde tierra, satélites de baja altitud. Esos sistemas serían guiados mediante "óptica adaptativa": espejos deformables y preparados para compensar continuamente las distorsiones atmosféricas. Pero los láseres de alta potencia consumirían cantidades ingentes de energía, y aun así el alcance y la efectividad de los haces se verían gravemente limitados por la dispersión, por la atenuación al atravesar humos y nubes, y por la dificultad de mantener el haz sobre el blanco el tiempo suficiente para causar daños.

Durante el desarrollo de la IDE, EE.UU. llevó a cabo varios experimentos con láser desde Hawai. En un ensayo se hacía que un haz rebotase en un espejo montado en un satélite. Siguen realizándose experimentos con láseres en el Polígono Optico Starfire, de la base Kirtland de la Fuerza Aérea, en Nuevo México. La documentación presupuestaria del Pentágono de los años fiscales 2004 a 2007 incluía, entre los objetivos de las investigaciones del Starfire, las operaciones antisatélite, lo que quedó suprimido en los documentos presupuestarios del año fiscal 2008 después de que el Congreso hiciera averiguaciones. El sistema de Starfire incorpora una óptica adaptativa que estrecha el haz láser emitido y aumenta así la concentración de energía. Esta característica no es necesaria para la formación de imágenes, ni para el seguimiento de trayectorias, un indicio más de que el Starfire podría emplearse como arma.

Pese a decenios de trabajos, las versiones aptas para el combate de armas de energía dirigida parecen lejanas, de momento. Cierto documento de planificación de la fuerza aérea predecía en 2003 que un arma con base en tierra capaz de "lanzar rayos láser a la atmósfera para [aturdir o aniquilar] satélites [de órbita baja]" podría estar disponible entre 2015 y 2030. Dado el estado actual de las investigaciones, esas fechas parecen optimistas.

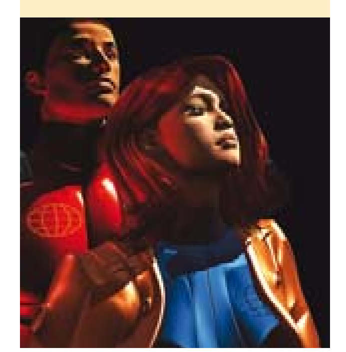
EL ALEGATO EN CONTRA

1 Es muy probable que todos los satélites y las armas basadas en el espacio sigan siendo muy vulnerables a los ataques.

2 El desarrollo de armas antisatélite avanzadas desencadenará probablemente una nueva carrera de armamentos internacional.

3 El costo de las armas espaciales es enorme.

4 Las pruebas y la utilización de las armas espaciales podría dejar ingentes cantidades de desechos en órbita, una auténtica amenaza contra los satélites y naves espaciales tripuladas.



Satélites co-orbitales

Adelantos recientes en sensores miniaturizados, ordenadores embarcados de gran potencia y motores cohete de alto rendimiento han hecho cada vez más viable una tercera técnica antisatélite: el microsatélite ofensivo (*véase el recuadro* "Satélites co-orbitales"). Un ejemplo de la potencialidad de éste nos lo ofrece el proyecto Serie de Satélites Experimentales (XSS) de la Fuerza Aérea, que está desarrollando microsatélites que ejecuten "operaciones autónomas de proximidad" en derredor de satélites de mayor tamaño. Los primeros microsatélites del programa, los XSS-10 y XSS-11, fueron lanzados en 2003 y 2005. Aparentemente destinados a inspeccionar satélites mayores, esos microsatélites podrían también tomar como blanco de una embestida a otros satélites o transportar explosivos o equipos de energía dirigida, tales como sistemas de radiointerferencia o emisores de microondas de gran potencia. Los documentos presupuestarios de la fuerza aérea muestran que la XSS está vinculada a un programa, denominado Técnicas de Armas Avanzadas, dedicado a la investigación sobre sistemas militares de láser y microondas.

Durante la guerra fría, la Unión Soviética desarrolló, ensayó e incluso declaró operativo un sistema co-orbital antisatélite, un interceptor maniobrable con una carga útil explosiva que se lanzaba desde un misil para colocarlo en una órbita cercana a un satélite blanco en órbita terrestre baja. El ingenio venía a ser una "mina espacial" inteligente. Se probó en 1987 por última vez y probablemente ya no esté operativo. Hoy un interceptor de ese tipo sería posiblemente un microsatélite que se estacionaría en una órbita que se cruzaría con las órbitas de varios de sus objetivos potenciales. Podría entonces activarse a voluntad durante una aproximación.

En 2005 la fuerza aérea expuso un programa que proporcionaría "conciencia situacional localizada" en el espacio y "caracterización de anomalías" para satélites anfitriones amistosos en órbita geoestacionaria. El programa se conoce como ANGELS (*autonomous nanosatellite guardian for evaluating local space*, guardián autónomo nanosatélite para evaluación espacial local), y el renglón presupuestario que, según se cree, se refiere a él se centra en la consecución de "capacidades de evaluación espacial de alto valor para la defensa", incluido un "sensor de alerta para detección de vehículos de ascensión directa o co-orbitales". Es evidente que tales nanosatélites guardianes podrían servir, adecuadamente manejados en las cercanías de satélites enemigos, como armas ofensivas.



SATELITES CO-ORBITALES

VIABILIDAD: Media-Alta

PRESUPUESTOS ESTIMADOS (dólares):

- Interceptor emplazado en el espacio (cinético o de otro tipo): 5000-19.000 millones
- Perturbador de radiofrecuencias emplazado en el espacio: no disponible
- Mina espacial: 100-2000 millones

Las armas antisatélite de pequeño tamaño, o microsatélites, serían transportadas hasta las mismas órbitas que sus objetivos, donde los seguirían muy de cerca o se adherirían a ellos. Ya situadas, esas "minas espaciales" podrían realizar el ataque, al recibir la orden, con explosivos, pequeños proyectiles, sistemas perturbadores de radiofrecuencia o emisores de microondas de gran potencia, o simplemente colisionando con el blanco. En uno de los primeros diseños, la basura espacial resultante se recogía en el llamado matamoscas, o gran red (*derecha*).



SISTEMAS DE ENERGIA DIRIGIDA

VIABILIDAD: Media

PRESUPUESTOS ESTIMADOS (dólares):

- Láser emplazado en tierra 4000-6000 millones
- Láser emplazado en el espacio: (de potencia baja a alta): 3000-60.000 millones
- Emisor de microondas emplazado en el espacio: 200-5000 millones

Haces de láser procedentes de tierra guiados con precisión hacia el blanco mediante óptica adaptativa (espejos deformables que compensan la perturbación atmosférica) podrían saturar, inutilizar o destruir satélites de órbita terrestre baja. Los láseres de potencia media podrían "deslumbrar" a los satélites de toma de imágenes ópticas o dañar sus detectores sensibles. Los láseres de alta potencia "freirían" los satélites dañando su electrónica e incluso perforando su fuselaje. Como en cualquier momento los blancos orbitales rápidos se hallan en su mayoría sobre el horizonte terrestre, las bases de tierra podrían también dirigir haces de láser hacia espejos de transferencia, montados en dirigibles o en satélites, que redirigirían los haces hacia los blancos.



BOMBARDEROS ESPACIALES

VIABILIDAD: Baja

PRESUPUESTO ESTIMADO (dólares):
- **Bombardero espacial: 4000 millones**

El Vehículo Aéreo Común o Vehículo de Técnica Hipersónica, del Pentágono, no es por definición un arma espacial, pero para atacar un blanco en tierra a la hora o dos de su despliegue atravesaría el espacio ultraterrestre. Podría ser situado en órbita desde un avión espacial hipersónico. A continuación planearía sin propulsión a través de la atmósfera hasta lanzar su munición convencional sobre objetivos en tierra.

La lista sigue. Un "satélite parásito" se pegaría a los talones e incluso se adheriría a un objetivo en órbita geoestacionaria. El Farsat, mencionado en un apéndice al informe de 2001 de la Comisión [Donald] Rumsfeld para el Espacio, "se estacionaría en una órbita 'almacén' (quizá con muchos microsatélites en su interior), relativamente lejos de su objetivo, aunque listo para una maniobra de impacto".

Por último, hace algún tiempo la fuerza aérea propuso un sistema de armas de radiofrecuencia emplazado en el espacio, "una constelación de satélites dotados de transmisores de radiofrecuencia de gran potencia con la capacidad de desorganizar, destruir o inutilizar una amplia variedad de equipos electrónicos y sistemas de mando y control de nivel nacional".

Los documentos de planificación de la fuerza aérea posteriores a 2002 preveían que tales técnicas surgirían después de 2015. Pero expertos externos creen que las armas orbitales de radiofrecuencia y microondas ya son hoy técnicamente viables y podrían desplegarse en un futuro próximo.

Bombarderos espaciales

Aunque no se le define como arma espacial, el Vehículo Aéreo Común o Vehículo de Técnica Hipersónica (CAV), del Pentágono, entra en esta exposición porque, lo mismo que un ICBM, atravesaría el espacio y golpearía objetivos terrestres. Se trata de un vehículo hipersónico planeador, no propulsado pero muy maniobrable, que se desplegaría desde un avión espacial hipersónico, se zambulliría en la atmósfera y dejaría caer bombas convencionales sobre blancos terrestres. Recientemente, el Congreso empezó a dotar de fondos al proyecto; mas, para no atizar una potencial carrera de armamentos en el espacio, ha prohibido todo trabajo encaminado a instalar armas en el CAV. Aunque los técnicos están avanzando sin pausa en las técnicas básicas de este programa, tanto el vehículo como su avión espacial nodriza se hallan a decenios vista, se supone.

Parte de la sensibilidad del Congreso ante el diseño del CAV puede deberse a otra idea de arma espacial mucho más controvertida, si bien con propósito parejo: los haces de barras hiperveloces que se lanzarían sobre la Tierra desde plataformas espaciales. Hace decenios que los ingenieros de la Fuerza Aérea piensan en cómo situar en órbita unas armas que pudieran atacar blancos terrestres, en particular búnkeres enterrados "reforzados" y escondrijos de armas de destrucción masiva. Común-



OTROS SISTEMAS ANTISATELITE

Posiblemente, la mayoría de las principales potencias militares ha experimentado con sistemas de radiofrecuencia basados en tierra capaces de inutilizar los sistemas de comunicaciones de los satélites. Además, todos los países poseedores de misiles balísticos con ojiva nuclear podrían detonar un arma atómica en órbita, lo que causaría estragos entre la mayoría de los satélites y vehículos espaciales.

PRESUPUESTOS ESTIMADOS:
- **Perturbador de radiofrecuencias basado en tierra: decenas de millones de dólares**
- **Arma nuclear (para países ya poseedores de misiles con ojivas nucleares): mínimo**



CUANDO EL POLVO NO SE DESPEJA

Un conflicto militar en el espacio podría liberar una nube de desechos capaz de dañar o destruir los satélites y las naves espaciales tripuladas que circunvuelan la Tierra. A velocidades orbitales, incluso los más minúsculos objetos podrían penetrar a fondo en un vehículo y destrozar equipos vitales (*derecha*). Los resultados de una detonación nuclear en el espacio podrían ser aún peores: el impulso electromagnético y la descarga de partículas cargadas degradarían casi por completo incluso los sistemas electrónicos mejor apantallados que hubiera en órbita. Una guerra en el espacio podría devolver la economía mundial a los años cincuenta del siglo pasado, pues las comunicaciones, la navegación, la meteorología y otros servicios avanzados vía satélite resultarían impracticables durante años.

▲ 2. PERFORACION en el satélite Solar Maximum Mission tras una colisión con basura espacial minúscula.

OFICINA DEL PROGRAMA DE RESIDUOS ORBITALES DE LA NASA

mente conocidos como “barras de Dios”, los haces estarían formados por largas barras de tungsteno, de hasta seis metros de longitud y 30 centímetros de anchura. Cada una sería arrojada a gran velocidad desde una nave espacial en orbita y guiada hacia su blanco a una velocidad impresionante.

Pero los costes y las leyes de la física obstaculizan su viabilidad. Asegurar que la fricción de reentrada no vaporice ni deforme los proyectiles a la vez que éstos mantienen una trayectoria de vuelo precisa y casi vertical, sería dificilísimo. Indican los cálculos que la eficacia de las barras no explosivas resultaría similar a las municiones corrientes. Además, resultarían exorbitantes los gastos de subir hasta alturas orbitales unos proyectiles de tal peso. Por tanto, pese al incesante interés que despiertan, las barras de Dios parecen seguir en el ámbito de la ciencia ficción.

Obstáculos de las armas espaciales

Entonces, ¿qué impide a EE.UU. (y a otros países) perseguir decididamente la construcción de armas espaciales? La presión en contra es triple: oposición política, dificultades técnicas y costos elevados.

La ciudadanía norteamericana está profundamente dividida sobre el acierto o no de incorporar la guerra espacial a la estrategia nacional militar. Los riesgos son múltiples. Ya he comentado antes las inestabilidades propias de una carrera armamentística, pero cuando se trata de potencias nucleares hay una cuestión adicional, relativa a la estabilidad. Desde siempre, los satélites espía y de alerta precoz desempeñaron un papel crucial en rebajar el temor a un ataque nuclear por sorpresa. Pero si las armas antisatélite los inutilizasen, la incertidumbre y desconfianza consiguientes podrían desembocar en una catástrofe.

Uno de los retos técnicos más graves que plantean las armas espaciales es la proliferación de basura espacial, a la que aludí antes. Según investigadores de la fuerza aérea, de la NASA y de Celestrak (un sitio independiente en la Red, con información sobre los satélites en órbita), la prueba de los chinos dejó como restos una nube de más de 2000 trozos del tamaño de pelotas de béisbol o mayores, que giraban en órbita alrededor del planeta a una altitud variable, entre 200 y 4000 kilómetros. Quizá quedaran sueltos otros 150.000 objetos de un centímetro o más de sección. Las altas velocidades orbitales hacen que incluso los más minúsculos desechos espaciales resulten peligrosos para las naves espaciales de todo tipo.

Las estaciones terrestres no pueden controlar ni rastrear fiablemente objetos en órbita terrestre baja de tamaño inferior a unos cinco centímetros (del orden de un metro en órbita geoestacionaria) para posibilitar las maniobras elusivas de los satélites. De hecho, para no ser dañados por la basura espacial china, dos satélites estadounidenses tuvieron que alterar el rumbo. Los disparos de una guerra en el espacio convertiría éste en un entorno contaminado, no apto para la navegación de los satélites de órbita terrestre.

La autora

Theresa Hitchens dirige el Centro de Información de Defensa en Washington, D.C., y es responsable de su Proyecto de Seguridad en el Espacio, en cooperación con la Fundación Secure World. Es autora de *Future Security in Space: Charting a Cooperative Course* (2004) y fue directora de *Defense News* entre 1998 y 2000. Se ha especializado en las fuerzas armadas, la industria de defensa y asuntos de la OTAN. En fechas más recientes, Hitchens prestó sus servicios como directora de investigación del Consejo Anglo-Americano de Información sobre Seguridad, un comité de expertos.

Emplazar las armas en órbitas presenta también unos difíciles obstáculos técnicos. Resultarían tan vulnerables como los satélites a toda clase de agentes externos: basura espacial, proyectiles, señales electromagnéticas, incluso micrometeoritos naturales. Proteger las armas espaciales de esas amenazas sería además impracticable, sobre todo porque se requerirían unas protecciones voluminosas, que supondrían una masa adicional, con la multiplicación consiguiente de los costos de lanzamiento. Las armas orbitales serían esencialmente mecanismos autónomos, que cometerían errores operativos y probablemente sufrirían averías. Puesto que no resulta demasiado difícil predecir las trayectorias de los objetos en órbita, no podrían disimularse tales armas voluminosas. Y como los satélites en órbita terrestre baja se sitúan en la vertical sólo unos pocos minutos cada vez, mantener uno de ellos constantemente al alcance requeriría un gran número de armas.

Por último, está el alto precio de llegar al espacio y operar allí; se cifra entre 4000 y 20.000 dólares por kilogramo para alcanzar las órbitas terrestres bajas y entre 30.000 y 40.000 dólares por kilogramo para las órbitas geoestacionarias. Cada arma instalada en el espacio requeriría su sustitución en períodos de entre siete y 15 años; tampoco serían baratas las reparaciones en órbita.

Alternativas a la guerra en el espacio

Dados los riesgos de la guerra espacial para la seguridad nacional e internacional, así como los obstáculos técnicos y financieros a superar, resultaría como mínimo prudente que los países presentes en el espacio hallaran un modo de prevenir una carrera armamentística en él. EE.UU. se ha orientado a la reducción de la vulnerabilidad de su flota de satélites y a examinar opciones alternativas que lo liberen de la dependencia de los servicios vía satélite. En cambio, la mayoría de los demás países con capacidad espacial están a la busca de medidas multilaterales diplomáticas y legales. Las opciones abarcan desde tratados que prohibirían las armas antisatélite y las emplazadas en el espacio hasta medidas voluntarias que contribuirían a consolidar la transparencia y la confianza mutua.

La administración Bush se ha opuesto firmemente a cualquier clase de negociación sobre armas espaciales. Los contrarios a los acuerdos multilaterales sobre la cuestión sostienen que las otras partes (particularmente China) se sumarán, aunque seguirán abasteciendo sus arsenales secretos, pues esas violaciones del tratado no pueden detectarse. Alegan, además, que EE.UU. no puede permanecer inactivo mientras sus adversarios potenciales se hacen con unos recursos espaciales que podrían reforzar su capacidad ofensiva en tierra.

Los partidarios de los tratados internacionales replican que, si no se negocian esos acuerdos, se perderán muchas posibilidades. Una carrera de armamentos en el espacio podría acabar comprometiendo la seguridad de todos los países, incluida la de EE.UU., a la vez que tensaría las capacidades económicas de los competidores hasta el punto de ruptura. Y mientras muchos defensores de una prohibición de armas espaciales admiten que será difícil elaborar un tratado totalmente verificable —puesto que la técnica espacial puede emplearse para fines tanto civiles como militares—, ya existen tratados en vigor que no requieren una verificación estricta. Un buen ejemplo de ello es la Convención sobre Armas Biológicas.

Ciertamente, una prohibición de pruebas y empleo (no del despliegue) de la clase de armas espaciales más peligrosas a corto plazo —los sistemas antisatélite destructivos (en vez de los perturbadores)— sería fácilmente verificable, porque los observadores en tierra pueden detectar la basura orbital. Además, todo signatario de un tratado sabría que todos sus lanzamientos serían rastreados desde tierra y que todo objeto sospechoso en órbita sería etiquetado como tal de inmediato. El clamor internacional que resultaría de unas violaciones tan patentes del tratado podría disuadir a los violadores en ciernes.

Pero desde mediados de los noventa no se progresa para establecer un nuevo régimen espacial multilateral. EE.UU. ha bloqueado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarme, en Ginebra, los esfuerzos para iniciar negociaciones sobre un tratado de prohibición de armas espaciales. China, mientras, ha rehusado aceptar nada que sea menos que eso. Por tanto, siguen estancadas medidas intermedias, tales como la construcción voluntaria de un marco de confianza, el control del tráfico espacial o un código de conducta responsable para los países presentes en el espacio.

La guerra en el espacio no es inevitable. Pero el reciente cambio en la política de EE.UU. y los actos provocativos de China han puesto de relieve que el mundo se acerca a una encrucijada. Los países deben hacer cuestión de interés propio la prevención de las pruebas y el empleo de armas orbitales. Los gobiernos deben decidir sin tardanza si es posible mantener una exploración del espacio pacífica que ya ha durado medio siglo. Cualquier opción alternativa sería inaceptable para todos.

Bibliografía complementaria

REPORT OF THE COMMISSION TO ASSESS UNITED STATES NATIONAL SECURITY SPACE MANAGEMENT AND ORGANIZATION. Informe de la Comisión Rumsfeld para el Espacio, 2001. Disponible en www.fas.org/spp/military/commission/report.htm

THE U.S. AIR FORCE TRANSFORMATION FLIGHT PLAN. Future Concepts and Tranformation Division, noviembre 2003. Disponible en www.af.mil/library/posture/AF_TRANS_FLIGHT_PLAN-2003.pdf

THE PHYSICS OF SPACE SECURITY: A REFERENCE MANUAL. David Wright, Laura Grego y Lisbeth Gronlund. American Academy of Arts and Sciences, 2005.

CHINA'S ASAT TEST: MOTIVATIONS AND IMPLICATIONS. Philip C. Saunders y Charles D. Lutes. Informe especial del INSS, Institute for National Strategic Studies. National Defense University, 2007.

Centro de Información de Defensa del Instituto Mundial de seguridad: www.cdi.org

Rotura de las placas tectónicas

Las cicatrices de antiguas colisiones marcan el camino por donde los continentes vuelven a romperse

J. Brendan Murphy, Gabriel Gutiérrez Alonso, R. Damian Nance, Javier Fernández Suárez, J. Duncan Keppie, Cecilio Quesada, Rob A. Strachan y Jaroslav Dostal

Cuando las aves evolucionaron a partir de los reptiles, hace entre 100 y 200 millones de años, nacía el océano Atlántico. Su formación señalaba la destrucción de un supercontinente, Pangea, en el que todos los continentes de la Tierra se habían reunido para formar una isla gigante rodeada por un océano global. Pangea no es el único supercontinente de la historia de la Tierra, pero sí el más reciente. Las masas continentales actuales han derivado alrededor del globo terráqueo chocando unas con otras y separándose posteriormente varias veces durante los últimos 3000 millones de años. Esos ciclos de confrontación y dispersión continental han afectado a la corteza terrestre, el manto subyacente, la atmósfera, el clima y la vida en el planeta.

De la misma forma que las colisiones continentales originan cadenas montañosas, las roturas generan profundos valles intracontinentales (*rifts*, como el Gran Valle del Rift en el este del continente africano) o, si la separación va a más, cuencas oceánicas. Pero no todos los océanos se crean por la rotura y separación de grandes bloques continentales. Algunos se forman cuando pequeños y estrechos "microcontinentes" (del tamaño y forma de Nueva Zelanda o Japón) se desgajan del margen de un bloque continental y se alejan, creando tras su paso una nueva cuenca oceánica. Stephen Johnston, de la Universidad de Victoria, llama a esos esbeltos titanes "continentes acintados" ("ribbon continents"); junto con las cuencas oceánicas asociadas a su origen, desempeñan una función fundamental en la dinámica de la corteza terrestre.

Nuestro grupo ha investigado la formación de un cuerpo oceánico extinto: el océano Reico, que nació hace unos 500 millones de años. Debe su nombre a Rea, esposa de Cronos y madre de Zeus en la mitología griega. Ese océano se creó cuando dos continentes acintados, Avalonia y Carolina, se desprendieron del margen septentrional de Gondwana (un antiguo continente de enorme extensión que incluía las actuales Africa, Sudamérica, India, Australia y Antártida). La colisión continental que selló el cierre del océano Reico, hace entre unos 350 y 300 millones de años, constituyó uno de los episodios fundamentales de la formación de Pangea.

Aunque se conocen las masas continentales que rodeaban el océano Reico y los hitos temporales que marcan su nacimiento y muerte, hasta fecha reciente no se habían identificado sus márgenes; tampoco las causas, los mecanismos y el momento del inicio de su apertura; ni la razón por la cual las tensiones que determinaron su apertura se invirtieron tras unos centenares de millones de años y lo cerraron de nuevo. Cuestiones todas ellas fundamentales para la geología.

Nuestras investigaciones muestran que el desgajamiento de Avalonia y Carolina de Gondwana ocurrió a lo largo de una "cicatriz" de la corteza, una línea cuya estructura se hallaba debilitada tras haber sufrido, hace unos 650 millones de años, un episodio previo de orogénesis. El hallazgo reviste suma importancia: sugiere que las zonas de debilidad preexistentes, próximas a los bordes continentales, controlan la creación y el movimiento de

CONCEPTOS BASICOS

- Las masas continentales actuales han derivado alrededor del globo terráqueo chocando unas con otras y separándose luego varias veces durante los últimos 3000 millones de años.
- El océano Reico, ahora extinto, nació hace unos 500 millones de años. Estudios geoquímicos y paleomagnéticos indican que se creó por el desgajamiento de Avalonia y Carolina, dos continentes acintados del margen septentrional del supercontinente Gondwana.
- La tracción de una placa en subducción causó la reapertura de una antigua sutura, una zona de debilidad cortical generada por un episodio previo de orogénesis ocurrido 150 millones de años antes.



1. LA COLISION DE LAS PLACAS TECTONICAS produce tensiones y calor que resultan en la deformación de los continentes. Este afloramiento en la costa de Cornualles, en el sudeste del Reino Unido, muestra un plegamiento causado por el calor y la presión asociados a la colisión de las placas.

FOTOGRAFIA DE LOS AUTORES/*American Scientist*

los continentes acintados. Y determinan, por tanto, los lugares donde se generarán nuevos océanos. Si estamos en lo cierto, es probable que la geografía moderna refleje una red de cicatrices de la corteza, formadas durante sucesivas fases previas de actividad tectónica.

Geología del océano Reico

La colisión entre masas continentales que cerró el océano Reico corresponde a la culminación de un largo período orogénico en el margen septentrional de Gondwana. Las tensiones implicadas crearon la cadena de los Apalaches en Norteamérica oriental, las montañas Variscas en Europa (cuyos fragmentos se encuentran repartidos desde la Península Ibérica y Gran Bretaña hasta Turquía), las montañas del Anti-Atlas en el noroeste de Africa (Marruecos) y los ancestrales Andes septentrionales (Venezuela y Colombia). Al par que esas montañas iban emergiendo, cifraban la información que nos permite conocer hoy la evolución del océano Reico.

Sin embargo, la rotura y desmembramiento de Pangea dispersó esos *terrenos*, o porciones de corteza continental, en un área extensa. Se ha destruido la mayoría de las pruebas de la existencia del océano Reico. Casi todas las rocas que formaron parte del fondo desaparecieron por subducción (se deslizaron por debajo de alguna de las placas vecinas, donde en ocasiones se fundieron con el manto viscoso del interior de la Tierra). Reconstruir la geología del océano Reico viene a ser, pues, como resolver un "sudoku" con demasiados cuadros en blanco. Con todo, merced al trabajo de los geólogos durante los últimos 40 años, se ha identificado una serie de yacimientos clave que arrojan luz sobre la historia de ese océano extinto.

Las zonas de debilidad cortical que determinaron el origen del océano Reico se generaron durante eventos tectónicos acaecidos con mucha anterioridad. Para entender las tensiones que influyeron en la formación del océano Reico debemos retrotraernos hasta hace entre 650 y 500 millones de años, cuando los márgenes amazónicos y africanos de Gondwana (su límite septentrional en las coordenadas actuales) sufrieron cambios de gran complejidad.

La mayoría de los geólogos piensan que, al tiempo que se constituía Gondwana, hace entre 600 y 550 millones de años, una imponente masa continental se separó del este de Gondwana, donde se encontraba Amazonia

(la parte norte de Sudamérica), creando los continentes de Laurencia (el germen de Norteamérica) y Báltica (la actual Escandinavia y parte de Rusia). La deriva de esos continentes, que se alejaban de Gondwana, dio lugar al océano Jápeto (en la mitología griega, hermano de Rea y padre de Atlas, quien dio nombre al océano Atlántico).

La evolución del margen septentrional de Gondwana guarda semejanza con la que experimentan hoy las Montañas Rocosas de Norteamérica y los Andes de Sudamérica. La geología de esos tres enclaves (dos modernos y otro ancestral) entraña la subducción de corteza oceánica y la separación de bloques continentales (como Baja California), con la consiguiente generación de grandes cantidades de magma (rocas fundidas). La composición química de las rocas *ígneas* (rocas resultantes del enfriamiento y solidificación del magma) que se generaron en el margen de Gondwana es semejante a la composición de las rocas ígneas de los Andes; ambas son características del magma creado por encima de una zona de subducción.

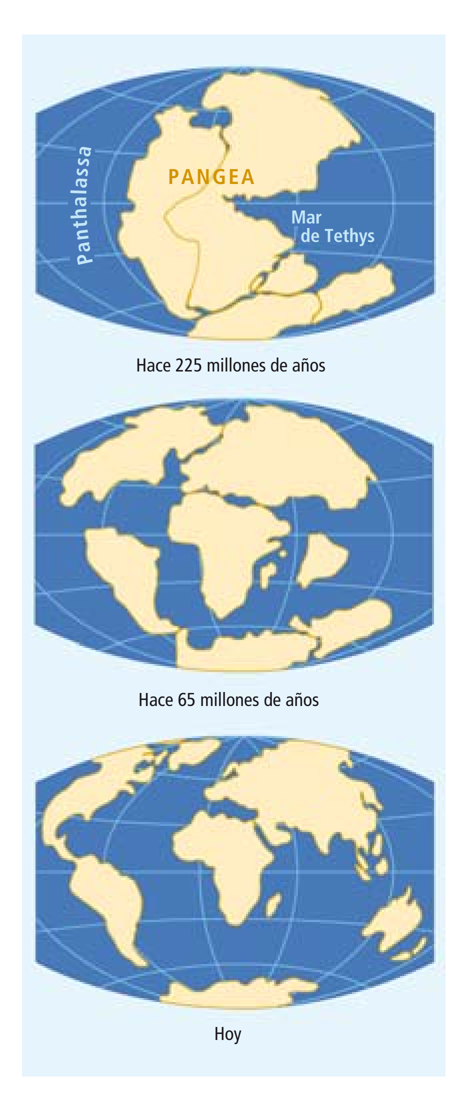
Ese margen aflora hoy, en forma de terrenos, en *cinturones orogénicos* (cadenas de montañas o los restos de las mismas una vez erosionadas) más jóvenes; sin embargo, la asociación anterior de estos terrenos con el margen de Gondwana se basa en las semejanzas halladas en la litología y en el registro fósil. También los estudios paleomagnéticos, que examinan la orientación de los minerales magnéticos en las rocas, indican que esos terrenos se formaron a la misma latitud que el margen septentrional de Gondwana. Los restos de esos antiguos volcanes y cámaras magmáticas, ahora visibles merced al levantamiento y erosión de la corteza, muestran que la actividad magmática terminó hace entre 600 y 540 millones de años, probablemente debido al desarrollo de un sistema de fallas asociado a la colisión de una dorsal oceánica contra la zona de subducción.

Esa situación guarda semejanza con la colisión que se produjo, hace unos 30 millones de años, entre la dorsal del océano Pacífico Oriental y una zona de subducción en el oeste de Norteamérica: originó la falla de San Andrés y provocó la desaparición del magmatismo relacionado con la subducción en el sudoeste de los EE.UU. y el noroeste de México. Durante ese intervalo temporal, a lo largo del margen septentrional de Gondwana, algunos terrenos fueron transportados a grandes distancias (hasta miles de kilómetros) en paralelo al mismo, de manera parecida a lo que ocurre hoy en la costa occidental de Norteamérica, a lo largo de la falla de San Andrés.

Hace entre 540 y 500 millones de años, la dinámica de las placas tectónicas en el norte de Gondwana estuvo dominada por fallas del tipo de la de San Andrés. Cesó la subducción; la región se convirtió en una plataforma continental estable en la que se depositaban rocas sedimentarias. Ese intervalo coincide con la aparición, a escala mundial, de fósiles con concha; en los sedimentos correspondientes a esas edades abundan restos de tales organismos.

En cada terreno, el registro rocoso de entre 650 y 500 millones de años de edad demuestra que estuvieron abiertos a un océano durante todo ese intervalo, aunque cambiaran las condiciones tectónicas. Hace unos 500 millones de años, se acabó la semejanza geológica entre terrenos, anuncio del desarrollo del océano Reico. Algunos de los terrenos del margen de Gondwana, como los que constituyen la Península Ibérica y Oaxaca (sur de México), muestran que los sedimentos se depositaron en aguas cada vez más profundas, hace entre 500 y 440 millones de años. En otros terrenos, como Carolina y Avalonia (hoy en los Apalaches), los sedimentos de ese período son mucho más finos, lo que debe interpretarse como una mayor distancia de una fuente de abundantes sedimentos (Gondwana). Un cambio que indica la apertura del océano Reico. Asimismo, los fósiles de esa época procedentes de Carolina y Avalonia difieren cada vez más de los fósiles de Gondwana.

Las propiedades magnéticas de las rocas de hace unos 460 millones de años muestran que Avalonia se encontraba entre 1700 y 2000 kilómetros al norte del margen de Gondwana. De lo que se infiere que el océano Reico se abría a una velocidad de entre 7 y 8 centímetros por año. Avalonia y Carolina eran entonces dos continentes acintados, similares a Nueva Zelanda, que separaban el océano Jápeto, al norte, del Reico, al sur (de la misma manera que Nueva Zelanda separa el océano Pacífico, al este, del mar de Tasmania, al oeste). Sin embargo, mientras Avalonia y Carolina derivaban hacia el norte, el margen septentrional de



2. LA ROTURA Y DESMEMBRAMIENTO DE PANGEA, que comenzó hace unos 200 millones de años, creó el océano Atlántico entre América y las actuales Europa y Africa. Al propio tiempo, el océano Tethys, que se extendió entre la India y Asia, y entre Africa y Europa, se cerró conforme esos dos pares de continentes colisionaban. Durante ese período, el océano que ocupaba casi todo el planeta, Panthalassa, se fue reduciendo al actual océano Pacífico, que sigue menguando a medida que es subducido en casi todo su perímetro.

Gondwana permanecía fijo a una latitud en torno a 60º sur y el margen sur de Laurencia a unos 10º sur. Por tanto, la apertura del océano Reico al sur de esos terrenos se veía compensada por el cierre del Jápeto al norte de los mismos.

De los datos paleomagnéticos se desprende que, hace unos 440 millones de años, Avalonia se hallaba muy cerca de Báltica (Europa occidental) y de Laurencia oriental. Durante los siguientes

PRINCIPIOS BASICOS DE LA TECTONICA DE PLACAS

De acuerdo con la teoría de la tectónica de placas, la Tierra consta de una capa externa rígida, la litosfera, de entre 100 y 150 kilómetros de espesor; debajo hallamos la astenosfera, una capa más caliente (a más de 1100 ºC), plástica (deformable), que forma parte del manto. A la manera de una cáscara de huevo resquebrajada, la litosfera se halla dividida en unos 20 fragmentos, o placas, que se desplazan alrededor del globo a velocidades inferiores a 10 centímetros al año. Según se van moviendo, interactúan unas con otras: colisionan, se separan y se deslizan. A corto plazo, esas interacciones generan tensiones que se liberan en forma de terremotos. En el transcurso de millones de años, se levantan cordilleras donde las placas colisionan y se forman océanos donde éstas divergen y se separan.

Los continentes se hallan incrustados en esas placas; se desplazan de modo pasivo y solidario con ellas. A lo largo de millones de años, los movimientos tectónicos han abierto y cerrado cuencas oceánicas enteras. Como botón de muestra, el alejamiento de América respecto de Europa y Africa durante los últimos 180 millones de años ha abierto el océano Atlántico, que continúa creciendo. El mapa del mundo que conocemos ahora corresponde, pues, a un fotograma de una película continua.

La fuerza que mueve esos continentes proviene de una cordillera submarina que discurre a lo largo de todo el Atlántico y que pertenece a un sistema global de cordilleras, o dorsales, mesooceánicas. En esas dorsales, el magma caliente que surge del manto subyacente crea litosfera. A la par que se crea nueva litosfera, se van separando cada vez más las placas adyacentes a la dorsal oceánica.

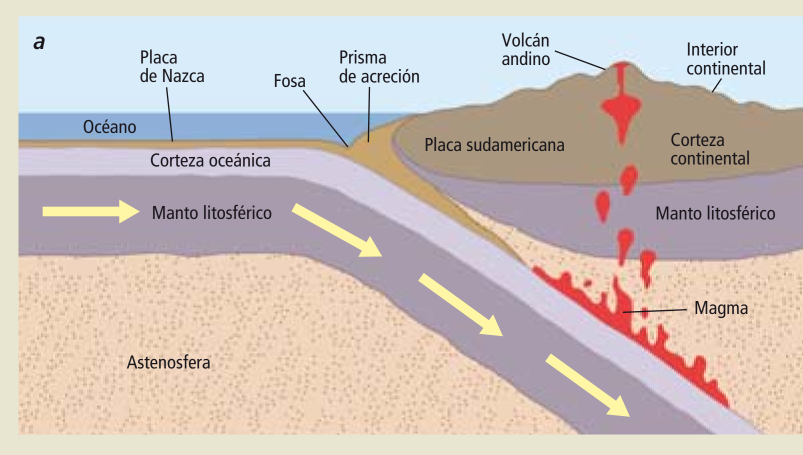
Dado que la superficie del planeta es constante, la creación de litosfera debe compensarse con la destrucción de litosfera antigua, en algún otro lugar, mediante *subducción*. Conforme el océano Atlántico se ha ido abriendo, el movimiento de América hacia el oeste ha provocado que el fondo del océano Pacífico se haya subducido bajo ésta.

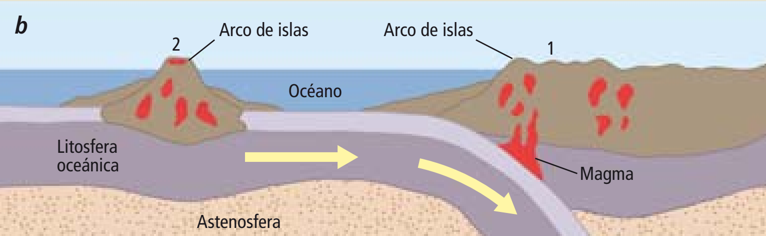
Cuando las placas convergen, la más densa es empujada por debajo de la más ligera y entra en el manto, donde se consume. La corteza oceánica, por lo común más densa que la corteza continental, suele subducir por debajo de placas continentales. Donde convergen dos placas oceánicas, se subduce la más antigua (y, por tanto, más densa). Por esa razón, la edad del fondo oceánico no alcanza los 180 millones de años, mientras que los continentes llegan hasta los 4000 millones de años de edad.

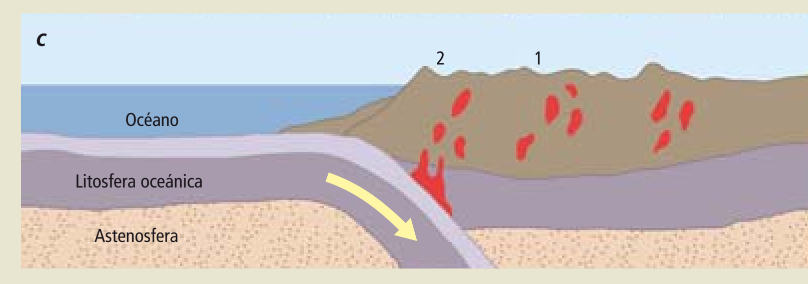
La subducción es responsable, directa o indirectamente, de la *orogenia*. Conforme las placas oceánicas, frías y densas, descienden hacia el interior de la Tierra, se van calentando y fundiendo. El magma que se produce, menos denso, asciende hacia la superficie: alimenta volcanes y calienta la corteza continental adyacente para erigir montañas.

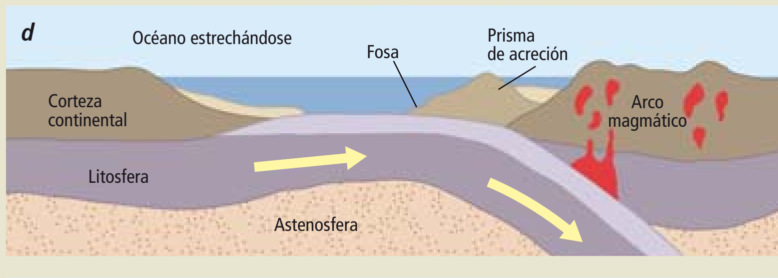
La colisión de un continente con continentes acintados o islas oceánicas (denominados en conjunto *terrenos*) corresponde a otra forma de orogenia. Todos los océanos modernos contienen islas (Nueva Zelanda y las islas Filipinas, por ejemplo), que se agregarán, por acreción, a un continente si el fondo oceánico entre esas dos masas emergidas se consume por subducción. La colisión resultante produce actividad magmática y deformación de las rocas, lo que resulta en la generación de nuevas montañas. Así ha sucedido en el oeste de Norteamérica, donde las colisiones de numerosos terrenos durante los últimos 200 millones de años han ido añadiendo más de 500 kilómetros de continente al borde occidental de la placa Norteamericana.

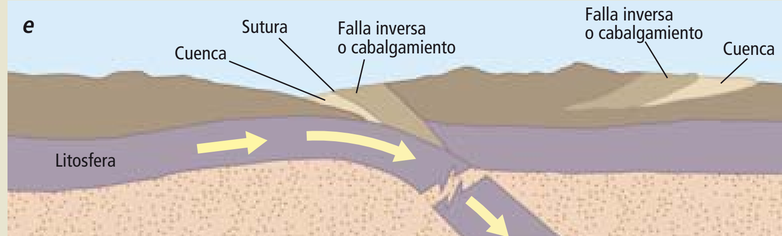
Si la placa que subduce contiene corteza continental, la colisión entre continentes produce montañas imponentes: éste es el caso del Himalaya, creado tras la colisión entre la India y el sudeste de Asia, y de los Alpes, nacidos del choque entre Africa del norte y Europa meridional.











LA SUBDUCCION DE LITOSFERA en la astenosfera calienta el manto y la corteza suprayacente; ello produce magma que puede acabar en la superficie en forma de volcanes. Los Andes ofrecen un ejemplo moderno de ese proceso (*a*). La subducción acerca islas volcánicas, que colisionan con el continente (*b*), dando lugar a montañas formadas por acreción (*c*). Las cordilleras del oeste de Norteamérica derivan de varios episodios de acreción ocurridos durante los últimos 200 millones de años. La subducción atrae continentes enteros uno contra otro: se cierran así cuencas oceánicas (*d*) y se producen colisiones continentales (*e*), que generan cadenas montañosas, como se observa en los Alpes y el Himalaya.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

30 millones de años, los tres continentes citados convergieron hasta colisionar para crear un continente mayor: Laurusia. La amalgamación de continentes cerró el océano Jápeto, generando en su lugar la cordillera Caledoniana. A partir de ese momento y a medida que el océano Reico era subducido bajo Laurusia, el supercontinente se movía atraído o arrastrado hacia el sur, donde se hallaba Gondwana. Los dos continentes completaron así el cierre del océano Reico para integrar Pangea, hace entre 340 y 290 millones de años, dando lugar a la formación de la cordillera Varisca.

Queda una cuestión pendiente: ¿por qué se formó el océano Reico en el lugar en que éste se inició? Para dilucidarla, nos centraremos en los mecanismos en cuya virtud Avalonia y Carolina se separaron de Gondwana hace unos 485 millones de años.

Zonas de debilidad cortical

Los terrenos, al chocar contra los márgenes continentales, desempeñan una función básica en el desarrollo de las cordilleras. El margen occidental de Norteamérica ofrece un buen ejemplo. Allí, las sucesivas colisiones de terrenos han provocado pulsos de actividad orogénica que han resultado en la formación de las Montañas Rocosas.

De acuerdo con nuestra investigación, el lugar donde se constituyó el océano Reico vino determinado por episodios geológicos ocurridos 150 millones de años antes, que generaron a lo largo del margen septentrional de Gondwana zonas de debilidad cortical. ¿De qué modo se formaron esas cicatrices geológicas?

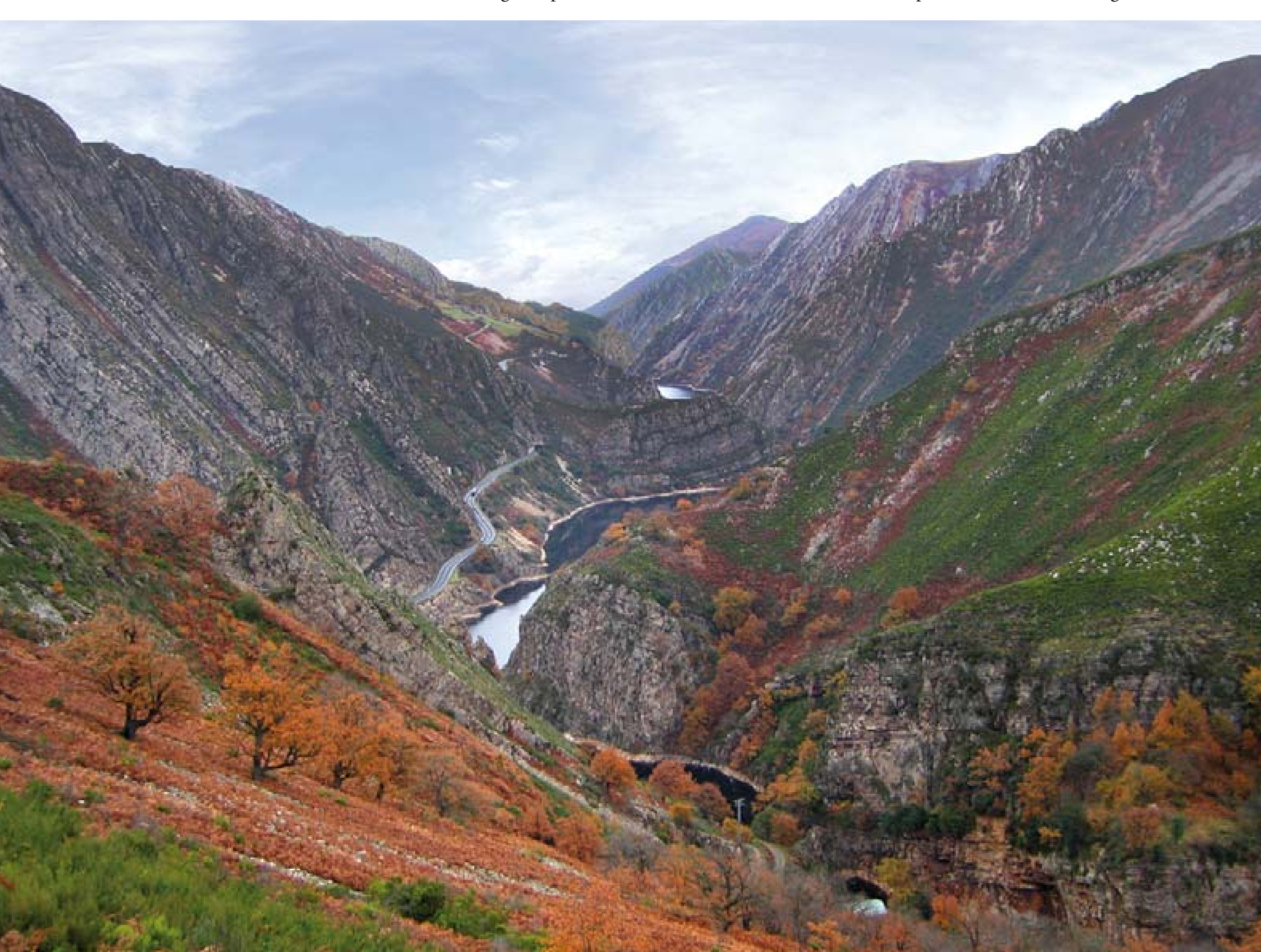
A tenor de la información recabada, las rocas ígneas que se formaron en el margen septentrional de Gondwana hace entre 630 y 570 millones de años pueden clasificarse en dos grupos, en función de la edad y la composición del material a partir del cual se originaron. Un grupo corresponde a magmas que provienen de la fusión de un "basamento" (rocas sobre las que se depositaron las rocas sedimentarias) continental y más antiguo. El otro grupo incluye magmas derivados de un basamento más joven (de unos 1000 millones de años).

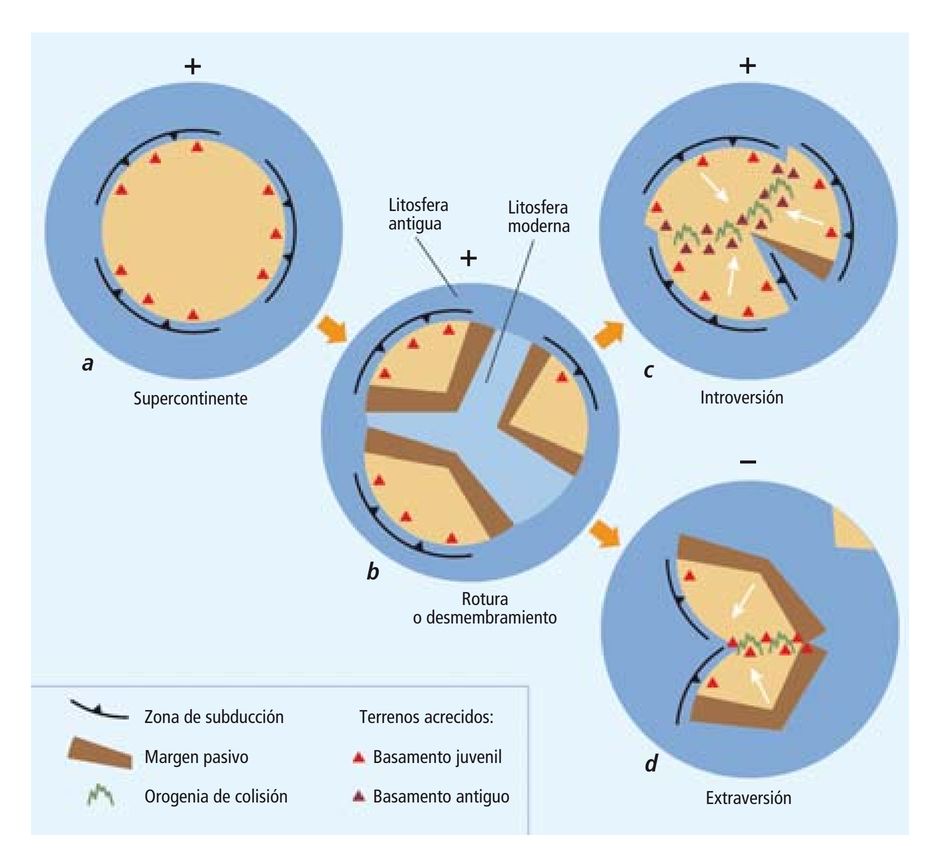
La edad del basamento que se fundió para dar lugar al magma que originó las rocas ígneas se deduce a partir de la composición isotópica de las mismas, en concreto, de la relación entre isótopos de samario (Sm) y de neodimio (Nd). La relación isotópica del neodimio, ε_{Nd}, indica el momento en que una roca se formó a partir del manto terrestre. Aunque la roca se vuelva a fundir, mantiene su relación isotópica hasta que se reincorpora al manto.

El grupo de rocas ígneas de Gondwana de procedencia más antigua se

FOTOGRAFIA DE LOS AUTORES

3. PLEGAMIENTO SINCLINAL en el valle del río Narcea, Asturias. Las rocas se formaron durante la apertura del océano Reico y se deformaron cuando éste se cerró.





4. LOS SUPERCONTINENTES están bañados por un océano "exterior", rodeados sus márgenes por zonas de subducción y regiones volcánicas (*a*). La rotura y dispersión de un supercontinente crea nuevos océanos "interiores" entre los continentes que se dispersan (*b*). El registro geológico indica que los océanos exteriores (*c*) e interiores (*d*) se cierran para generar un supercontinente ulterior. Los triángulos indican los terrenos que se han formado a partir de basamento juvenil (*rojo*) o antiguo (*morado*).

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

hallan hoy en el noroeste de Francia, el sur de la Península Ibérica y en algunos lugares de Alemania. Esas rocas suelen presentar valores de ε_{Nd} negativos (entre +1,6 y –9,9). El guarismo significa que, aunque formadas las rocas a partir de un magma que se solidificó hace unos 600 millones de años, el magma en cuestión provenía de los restos fundidos de un continente creado hace entre 1000 y 2000 millones de años.

Rocas de ese continente afloran hoy en el noroeste de Francia. Scott Sampson, de la Universidad de Syracuse, y Richard D'Lemos, de la Universidad de Oxford Brookes, han determinado la edad del basamento: unos 2100 millones de años. La composición isotópica de Sm y Nd indicaría, por tanto, que durante la formación de las rocas se habría producido la fusión del basamento de 2100 millones de años con magmas más jóvenes, o juveniles, provenientes del manto. Los cálculos de Sampson y D'Lemos guardan una estrecha semejanza con los que se obtienen para un extenso afloramiento de basamento situado en Africa occidental. Casi todas las reconstrucciones de la geografía de nuestro planeta en ese período (hace entre 600 y 550 millones de años) sitúan el basamento de Africa occidental en el margen septentrional de Gondwana. Apoyados en tales datos, suponemos que el grupo de rocas ígneas de procedencia más antigua se originaron en la fusión del basamento de Africa occidental.

El segundo grupo de rocas ígneas del margen septentrional de Gondwana se halla en el este de Norteamérica, el sur de Gran Bretaña, el centro y el norte de la Península Ibérica, y algunas regiones del este de Alemania, República Checa y Polonia. Esas rocas ígneas suelen presentar valores de ε_{Nd} positivos (entre +5,0 y –1,0), que se corresponden con edades de entre 750 y 1100 millones de años. El mínimo solapamiento con los valores obtenidos para el primer grupo de rocas da a entender que, pese al parecido externo, las rocas ígneas de edades comprendidas entre 630 y 570 millones de años derivaron de basamentos distintos. Las del primer grupo surgieron de magmas procedentes de rocas más antiguas, de unos 2100 millones de años de antigüedad; las del segundo grupo, de magmas que emergieron más tarde, hace entre 1100 y 750 millones de años.

Otros hallazgos respaldan nuestra hipótesis. En las rocas sedimentarias que se intercalan con las rocas ígneas, descubrimos fragmentos de rocas erosionadas que se acumularon en antiguas cuencas de drenaje. A partir de la desintegración de isótopos radiactivos de uranio, argón y potasio, se ha determinado la edad de algunos minerales de las rocas erosionadas; en particular, circón y mica blanca. En el primer grupo de rocas ígneas, las edades estimadas se agrupan en los intervalos siguientes: 600-650 millones de años, 2000-2200 millones de años y 2400-2600 millones de años. En el segundo grupo las edades son otras: 1000-1200 millones de años, alrededor de 1500 millones de años y 1800-2000 millones de años. Confirman tales datos que los dos grupos de rocas sedimentarias se hallaban unidas a dos sistemas de drenaje continental cuando se formaron; resultan de la erosión de rocas creadas en periodos distintos. Es más, las edades de los circones del primer grupo de rocas ígneas coinciden con las de la potencial área fuente, el basamento de Africa occidental, lo que ratifica su conexión con el oeste africano.

En cuanto a la fuente del segundo grupo de rocas ígneas, hallamos una pista en la edad de las rocas fuente: entre 1100 y 750 millones de años, según las relaciones isotópicas de Sm y Nd. En esa época tuvo lugar un episodio crucial para la geografía de nuestro planeta. Hace entre 1000 y 1100 millones de años, la colisión de múltiples fragmentos continentales provocó el levantamiento de grandes cadenas montañosas y la formación del supercontinente Rodinia (de "patria" en ruso). Más tarde, hace unos 750 millones de años, se produjo un desarrollo generalizado de plataformas continentales y magmas derivados del manto, fenómeno que remite a la posible rotura y desmembramiento del supercontinente.

La edad del magma a partir del cual se formó el segundo grupo de rocas ígneas coincide, pues, con la extensión temporal de la existencia de Rodinia. Sin embargo,

el basamento progenitor no pudo haber sido el propio continente de Rodinia, ya que su corteza continental era más antigua; debió proceder directamente del manto situado por debajo de Mirovoi ("mundo" en ruso), el océano que rodeaba a Rodinia. El segundo grupo de terrenos se originó en mar abierto, no en el continente. Además, debieron colisionar y amalgamarse al margen norte de Gondwana antes del inicio del proceso de subducción mencionado (que tuvo lugar entre hace 635 y 570 millones de años), pues durante esa época aparece en las nuevas rocas ígneas la "firma" juvenil del segundo tipo de basamento.

La colisión de terrenos con un margen continental se denomina *acreción*. Constituye uno de los mecanismos de formación de cordilleras que contienen rocas deformadas y recristalizadas, esto es, *metamórficas*. En cuanto al segundo grupo de terrenos, la presencia de rocas metamórficas en el sur de Gran Bretaña y en algunos sectores de Norteamérica oriental (sur de Terranova, Maine y Carolina) demuestra la acreción de los terrenos con Gondwana, hace entre 680 y 650 millones de años. El primer grupo de terrenos, en cambio, no muestran indicio alguno de acreción. Lo mismo que antes, semejante observación sugiere que esos terrenos se situaban a lo largo del margen de Gondwana, donde se hallaba el cratón de Africa occidental; reflejan, por tanto, el reciclado *in situ* de la corteza.

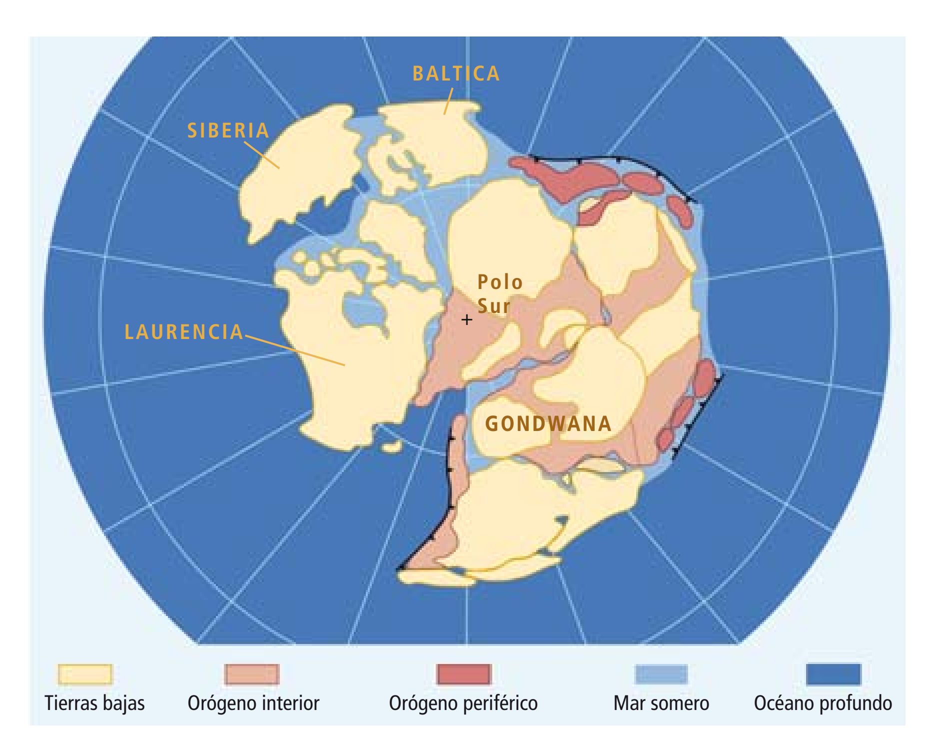
El contraste entre los terrenos que se hallaban a lo largo del margen de Gondwana y los que fueron agregados, por acreción, a dicho margen reclama la existencia de una gran separación, o sutura, entre ellos. El occidente de Norteamérica ofrece otro ejemplo de ese tipo de suturas. Desde hace 150 millones de años, varios terrenos del océano Pacífico han sido arrastrados y agregados, por acreción, a Norteamérica, produciendo varios pulsos orogénicos. Resultado de tal proceso, se produjo una importante sutura entre los terrenos acrecidos y la corteza más antigua de Norteamérica y, en nuestro estudio, de Gondwana.

Origen del océano Reico

El océano Reico se formó, pues, por la rotura y separación de Avalonia y Carolina, los mismos terrenos que habían sido agregados al margen de Gondwana 160



5. EL SUPERCONTINENTE DE RODINIA comenzó a disgregarse hace unos 800 millones de años. Se muestran los restos de las antiguas cordilleras (*verde*) y los lugares donde se supone que hubo corteza juvenil (*rojo*), parte de la cual formó posteriormente Avalonia y Carolina. Si bien se desconoce la posición exacta de la corteza en cuestión, la hemos situado —para facilitar la ilustración de los procesos que se describen— alejada de los grandes cratones (masas continentales estables), a los que se habían agregado, por acreción, hace unos 550 millones de años. (Ga equivale a mil millones de años.)



6. EL OCEANO JAPETO comenzó a formarse entre Gondwana y Laurencia hace entre 650 y 550 millones de años. Los orógenos interiores corresponden a las cordilleras formadas por la colisión de grandes placas tectónicas. Los orógenos periféricos se generan por subducción y acreción de terrenos en los bordes de los continentes o de los supercontinentes. En negro se marcan las zonas de subducción en los márgenes de Gondwana.

RECONSTRUCCION BASADA EN DATOS DE SERGEI PISAREVSKY, UNIVERSIDAD DE EDIMBURGO, GRAN BRETAÑA/STEPHANIE FREESE /*American Scientist*

MARCADORES ISOTOPICOS

El estudio del pasado geológico de un terreno equivale al estudio genealógico de una persona. Durante siglos, ciertos rasgos propios de nuestros antepasados se han perdido (el acento local, por ejemplo), pero otros se han mantenido al transmitirse de generación en generación (apellidos, canciones y bailes tradicionales). De igual modo, el paso del tiempo ha borrado en las rocas innumerables vínculos con el pasado. Con todo, algunos persisten: entre ellos, la composición isotópica. La relación de isótopos de los elementos del grupo de las tierras raras samario (Sm) y neodimio (Nd) refleja el momento en que los componentes de las rocas cristalizaron a partir del manto terrestre.

Los isótopos corresponden a átomos de un mismo elemento que difieren ligeramente en la masa. Numerosos elementos presentan varios isótopos, algunos de los cuales son inestables, radiactivos. Esos isótopos se convierten de forma espontánea, mediante un proceso que desprende energía, en otros isótopos más estables. El tiempo que tarda la mitad del "elemento progenitor" (inestable) en convertirse en el "elemento hijo" (más estable) se denomina *vida media*; es una constante característica de cada elemento. La vida media y la relación entre los isótopos "padre" e "hijo" se usan para calcular el tiempo transcurrido desde que comenzó la desintegración. Para rocas volcánicas, ese tiempo corresponde a la edad de cristalización, el tiempo que ha transcurrido desde que cristalizaron los minerales que los integran, es decir, la edad de la roca.

Don DePaolo, de la Universidad de California en Berkeley, y otros pioneros de la geología isotópica han demostrado que la transformación isotópica de Sm en Nd constituye uno de los mejores trazadores de los procesos ígneos y tectónicos. Esos dos elementos presentan propiedades químicas semejantes. Sin embargo, en los lugares donde el manto comienza a fundirse, el Nd (el más ligero de los dos) se concentra en el magma líquido que es extraído del manto y el Sm (más pesado) se concentra en el manto que no se ha fundido, o *manto empobrecido*.

El valor medio para la relación de Sm/Nd en toda la Tierra es de 0,32. Sin embargo, dada la tendencia del Nd a concentrarse en los magmas que escapan desde el manto hacia la corteza y del Sm para concentrarse en el manto empobrecido, la relación isotópica es menor en las rocas de la corteza (en torno a 0,2) y mayor en el manto empobrecido (alrededor de 0,5).

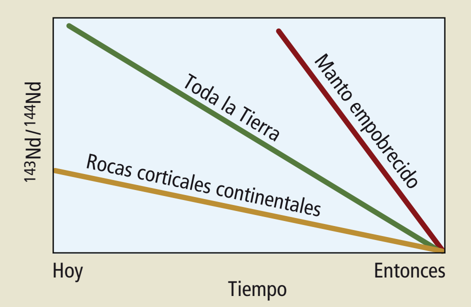
El samario-147 (^{147}Sm) es un isótopo radiactivo que se desintegra en el isótopo estable neodimio-143 (^{143}Nd). Conforme disminuye la cantidad de ^{147}Sm, aumenta la de ^{143}Nd. La vida media para esa transformación es de 106.000 millones de años.

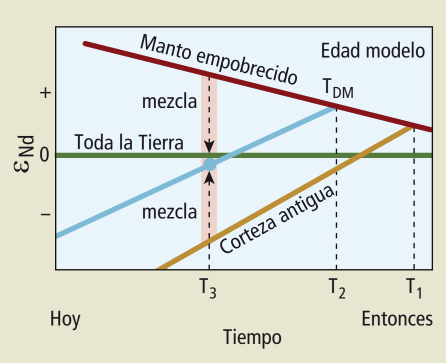
El neodimio-144 también es estable, pero no se genera a partir de la transformación radioactiva, por lo que su proporción en una roca no cambia con el tiempo. Dado que el ^{143}Nd aumenta con el tiempo y el ^{144}Nd se mantiene, la relación entre ambos (^{143}Nd/^{144}Nd) se ha elevado en las rocas de la corteza, del manto y del total de la Tierra. Pero dado que la relación Sm/Nd es mayor en el manto empobrecido que en el total de la Tierra, mayor a su vez que en la corteza, la transformación de ^{147}Sm en ^{143}Nd determina que la relación ^{143}Nd/^{144}Nd aumente con mayor prontitud en el manto empobrecido que en el total de la Tierra, y con mayor celeridad todavía en el total de la Tierra que en la corteza. En consecuencia, la composición isotópica Sm-Nd de los magmas generados en el manto empobrecido difiere de los generados en la corteza.

Los magmas mantienen la relación ^{143}Nd/^{144}Nd de la fuente que los originó. Los magmas formados por manto fundido presentarán, pues, una relación ^{143}Nd/^{144}Nd mayor que los magmas derivados de fundidos corticales. Cuando se conoce el momento en que cristalizaron esos fundidos, se aplica una corrección para las transformaciones radiactivas y se deduce la relación ^{143}Nd/^{144}Nd en el magma inicial. La relación inicial $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$ constituye la huella dactilar que registra el origen de esos magmas. Así, las rocas volcánicas que han derivado recientemente del manto difieren de las que proceden del reciclado de antiguas cortezas continentales, o de las que corresponden a una mezcla de ambas.

En términos absolutos, las diferencias entre la relación ^{143}Nd/^{144}Nd de las rocas mantélicas y corticales son reducidas. Para trabajar con mayor comodidad, se define un parámetro, ε_{Nd}, que refleja la diferencia entre la relación inicial ^{143}Nd/^{144}Nd en la roca estudiada y la que tendría el total de la Tierra cuando cristalizó la roca. Según ese criterio, ε_{Nd} para el total de la Tierra calculado para cualquier edad tomaría un valor igual a cero. Dado que la relación ^{143}Nd/^{144}Nd aumenta con mayor celeridad en el manto empobrecido y más lentamente en la corteza que en el total de la Tierra, los valores de ε_{Nd} se hacen, andando el tiempo, más positivos para el manto empobrecido y más negativos para la corteza. Esa evolución temporal corresponde a la "línea de crecimiento".

En la práctica, los geólogos usan esos principios a la inversa. Para las rocas derivadas de la corteza se calcula una línea de crecimiento (la variación de ε_{Nd} con el tiempo); se interpola luego hacia atrás, hasta que corta la línea de crecimiento del manto empobrecido. La intersección de las dos líneas de crecimiento corresponde al momento en que la roca tendría la misma composición isotópica que su origen en el manto empobrecido, es decir, el momento en que los componentes de esa roca fueron extraídos del manto. Los cálculos deben aplicarse con precaución, pues a medida que los magmas ascienden hacia la superficie se mezclan con otros fundidos de origen distinto; las muestras procedentes de magmas mezclados dan resultados poco fiables. Afortunadamente, los geólogos detectan, mediante otros indicadores geoquímicos, si ha habido mezcla, de modo que las rocas de origen incierto se excluyen de los cálculos.





EL MANTO EMPOBRECIDO retiene mayor proporción de samario (Sm) respecto de neodimio (Nd) que el magma líquido que constituirá la corteza continental. Así, el manto empobrecido presenta una relación Sm/Nd (~0,5) mayor que la del total de la Tierra (~0,32) o la de la corteza continental (~0,2). Esas relaciones, junto con la constante desintegración de ^{147}Sm en ^{143}Nd, explican que la relación ^{143}Nd/^{144}Nd aumente con mayor celeridad en el manto empobrecido que en el total de la Tierra o en la corteza continental (*arriba*). La diferencia en las relaciones iniciales entre el manto empobrecido y la corteza o el total de la Tierra (que se considera 0) se expresan en forma de ε_{Nd}. A partir de la relación Sm/Nd y el valor del ε_{Nd} de una muestra de roca (calculado para su edad de cristalización), se determina la línea de crecimiento (*abajo, línea azul*) que, una vez proyectada, cruza la línea correspondiente al manto empobrecido. Esa intersección indica la edad "modelo" del manto empobrecido (T_{DM}), la edad a la que la corteza derivó del manto (T_2). La mezcla de magma juvenil con corteza antigua (T_1) arroja resultados falsos (T_3).

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

Hace 540 Ma

Ecuador A

Laurencia

Terrenos de Avalonia

Polo Sur

Gondwana

B

Terrenos cratónicos

Ecuador A

B

Polo Sur

Hace 500 Ma

Hace 480 Ma

ca. 470 Ma

Océano Reico

Hace 450 Ma

Hace 430 Ma

Océanos Jápeto y Reico

Cratones

Basamento de Avalonia

Basamento cadomiense

Manto litosférico

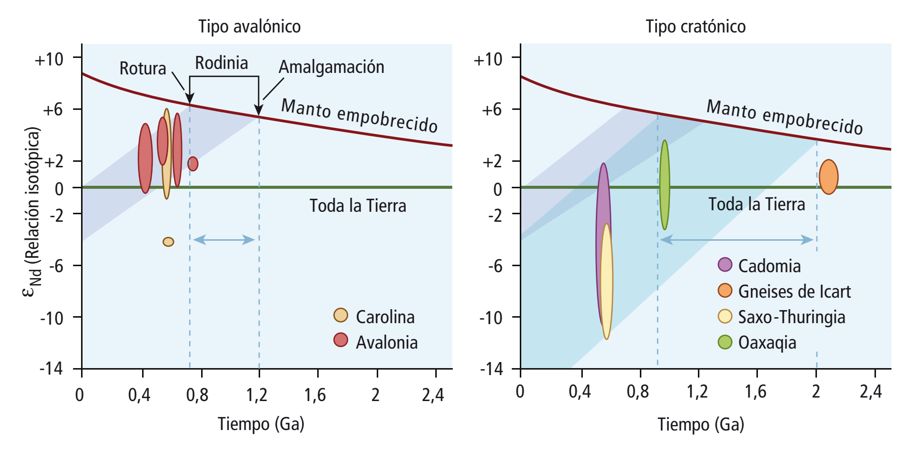
Corteza oceánica

Núcleo y manto (excepto manto litosférico)

Arco volcánico tacónico

7. RECONSTRUCCIONES GLOBALES Y SECCIONES GEOLOGICAS. Esta serie muestra las fuerzas que generaron el océano Reico y determinaron su evolución hace entre 540 y 430 millones de años (Ma). Hace 540 millones de años, el océano Jápeto se extendía desde Laurencia a Gondwana; contaba con una dorsal mesooceánica (*blanco*). Los terrenos más juveniles, Avalonia y equivalentes (*verde claro*), se movieron hacia el norte, deslizándose al lado de los que tenían un basamento más antiguo (*verde*), a lo largo de todo el margen de Gondwana. Hace 500 millones de años, la subducción hacia el sur que se originó al norte del océano Jápeto comenzó a cerrarlo, creando un arco volcánico (*rojo*). Tal y como describe Cees van Staal, del Servicio Geológico del Canadá, hace 480 millones de años Laurencia colisionó con esos arcos volcánicos; ello provocó la inversión de la dirección de subducción, con la subducción consiguiente de la dorsal mesooceánica de Jápeto. Desde ese momento, la corteza oceánica por debajo de Laurencia y en el margen de Gondwana pertenece a extremos distintos de la misma placa litosférica. La tracción de la placa causada por la subducción de Laurencia pudo haber provocado la reapertura de la sutura entre Gondwana y Avalonia; ello habría generado el océano Reico conforme Avalonia derivaba hacia el norte, alejándose de Gondwana. Hace entre 470 y 450 millones de años, la subducción bajo el margen septentrional de Avalonia produjo un nuevo conjunto de arcos volcánicos. Hace 430 millones de años, Avalonia se había agregado, por acreción, a Báltica y luego a Laurencia, lo que supuso el cierre del océano Jápeto. (Las secciones no se han dibujado a escala.)





8. LA RELACION ISOTOPICA DEL NEODIMIO (ε_{Nd}) indica en qué momento una roca emergió del manto terrestre. Esa "firma" isotópica se mantiene constante hasta que la roca se vuelve a incorporar al manto (no se altera aunque la roca se funda y recicle). Las rocas ígneas del margen septentrional de Gondwana se agrupan en dos conjuntos de edades. Los terrenos acrecidos (más jóvenes, *a la izquierda*) se formaron a partir de fragmentos fundidos de corteza juvenil, creada a partir del manto empobrecido de hace entre 750 y 1100 millones de años. Los terrenos cratónicos (más antiguos, *a la derecha*) constaban de restos fundidos de corteza continental más antigua, extraída del manto hace entre 1500 y 2100 millones de años. Los terrenos acrecidos que se muestran incluyen Avalonia (que en la actualidad ocupa parte de Norteamérica y el sur de Gran Bretaña) y Carolina (parte del este de los EE.UU.). Los terrenos cratónicos incluyen Cadomia y los gneises de Icart (noroeste de Francia), el terreno de Sajonia-Turingia (Alemania) y Oaxaquia (México). El área de los terrenos acrecidos coincide con el tiempo de existencia del supercontinente Rodinia; las flechas indican la formación y el inicio de la dispersión. El área para los terrenos cratónicos es más antigua y también más amplia. (Ga equivale a mil millones de años.)

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

millones de años antes. Ambos continentes acintados se situaban entre el océano y la sutura con la masa continental principal. Según los datos paleontológicos y magnéticos, la mayoría de los terrenos situados entre la sutura y el continente permanecieron unidos a Gondwana.

Los autores

J. Brendan Murphy es profesor de geología estructural, tectónica y petrología en la Universidad de San Francisco Javier, en Nueva Escocia. **Gabriel Gutiérrez Alonso** imparte clases de geología estructural y dinámica global en la Universidad de Salamanca. **R. Damian Nance** profesa en la Universidad de Ohio en Athens. **Javier Fernández Suárez** enseña geoquímica en la Universidad Complutense de Madrid. **Duncan Keppie** es profesor de la Universidad Nacional Autónoma de México; trabaja desde hace más de 40 años en universidades y servicios geológicos de EE.UU., Zambia, Canadá y México. **Cecilio Quesada** es investigador en el Instituto Geológico y Minero de España; se dedica al estudio de la evolución tectónica de la Península Ibérica. **Rob A. Strachan** desarrolla su labor investigadora en la Universidad de Portsmouth. **Jaroslav Dostal** es profesor emérito de petrología y geoquímica en la Universidad de Saint Mary en Nueva Escocia.

El primer episodio relacionado con la fractura que dio lugar al nacimiento del océano Reico sucedió hace entre 540 y 490 millones de años, una vez cesó la actividad magmática relacionada con la subducción bajo el margen septentrional de Gondwana. A esa rotura le siguió una importantísima acumulación de sedimentos provenientes del margen continental, acompañada de actividad volcánica local. Es posible que Avalonia y Carolina se separasen del margen norte de Gondwana moviéndose en paralelo al mismo, a lo largo de la sutura (el actual golfo de California se ha abierto de manera similar, lo que está causando el movimiento de la península de Baja California por la Falla de San Andrés). Los datos paleontológicos y paleomagnéticos sugieren que, durante ese período, las vías marinas en el norte de Gondwana eran, como el golfo de California, estrechas.

Un segundo episodio relacionado con la apertura del océano Reico comenzó hace unos 490 millones de años, cuando Avalonia y Carolina empezaron a derivar hacia el norte a través del océano Jápeto. El aumento progresivo de la separación respecto de Gondwana queda reflejado en los conjuntos fósiles de esta época.

Hace unos 460 millones de años, Avalonia ya se hallaba a unos 40º latitud sur, o, lo que es lo mismo, entre 1700 y 2000 kilómetros al sur de Laurencia; el margen de Gondwana permanecía a unos 60º latitud sur. Ello indica que Avalonia se desplazaba hacia el norte a una velocidad de 6 a 8 centímetros anuales. Parece que Carolina se hallaba más al norte todavía y desconectada de Avalonia. La situación de ambos terrenos, separados de Gondwana y Laurencia, sugiere que eran islas similares a Nueva Zelanda, cuya deriva hacia el norte fue cerrando de modo progresivo el océano Jápeto, al tiempo que el océano Reico se abría por detrás de ellas.

En conjunto, los datos muestran que los lugares donde se produjo la rotura que ocasionó la apertura del océano Reico se corresponden con la reactivación de las zonas de sutura generadas, hace unos 650 millones de años, por la acreción en el margen de Gondwana de terrenos formados por corteza juvenil. Se desarrollarían esfuerzos tensionales que reactivaron esa antigua herida y separaron los terrenos por el costado que daba al océano.

El mecanismo que produjo la rotura y posterior deriva del terreno ("rift-to-drift") no se conoce con precisión. Pero se han propuesto varios modelos. Durante episodios de subducción, los terrenos se separan del margen continental al que estaban unidos si la placa que subduce retrocede y se enrolla ("roll back") a medida que desciende hacia el manto. Ese tipo de subducciones se han detectado en la actualidad en el Pacífico occidental. Sin embargo, los terrenos que se separan así, suelen permanecer unidos al margen continental del que se han desprendido; muchos de ellos vuelven a agregarse al mismo. En el caso de Avalonia y Carolina, no hay pruebas claras de que sufrieran un proceso de ese tipo.

Otro modelo —más probable— para explicar la apertura del océano Reico se deduce a partir de la cronología de la principal fase de rotura, que empezó hace unos 490 millones de años. En aquel momento, en el norte del océano Jápeto se estaba produciendo la acreción de terrenos oceánicos y la colisión con la dorsal centrooceánica, lo que causó deformaciones en las rocas del margen meridional de Laurencia. Se inició a continuación una nueva etapa

de subducción bajo el margen de Laurencia. Después de la colisión de la dorsal, la nueva zona de subducción quedaría conectada con el margen septentrional de Avalonia y Carolina. A medida que una placa subducente sufre cambios mineralógicos que aumentan su densidad, ejerce una fuerza de tracción ("slab-pull") sobre la parte de la placa alejada de la zona de subducción (lo mismo ocurre cuando el extremo de un mantel sobresale en exceso por el borde de la mesa y arrastra el resto del mantel, incluidas las migas que haya encima). Quizás Avalonia y Carolina fueron desgajadas de Gondwana por la tracción que ejerció su propia placa al ser subducida bajo el margen de Laurencia.

Formación de Pangea

La aglomeración de continentes que destruyó el océano Reico culminó con la colisión de Gondwana con Laurusia, un episodio crucial para la formación de Pangea. El estudio del origen y la evolución de esa extinta masa de agua resulta, por tanto, fundamental para comprender las fuerzas que crearon Pangea. El océano Reico se abrió con la partida de uno o dos continentes estrechos del margen septentrional de Gondwana (Carolina y Avalonia). Mediante técnicas de caracterización y trazado isotópico, se demuestra que esos terrenos se formaron en el océano Mirovoi, hace entre 750 y 1100 millones de años, y que se agregaron a Gondwana hace unos 650 millones de años. Una zona de debilidad, o sutura, debió separar del antiguo margen de Gondwana esos terrenos recién acrecidos. La subsiguiente subducción bajo ese margen, que comenzó hace 635 millones de años y en algunos lugares llegó a durar más de 90 millones de años, generó una poderosa actividad magmática en los terrenos acrecidos y en la corteza más antigua de Gondwana (Africa occidental).

Hace entre 540 y 500 millones de años, el cese de la subducción instó el establecimiento de un entorno de plataforma continental en dicho margen de Gondwana. Hace unos 490 millones de años, los terrenos que se habían ido agregando, por acreción, al margen de Gondwana (Avalonia y Carolina) comenzaron a separarse de ese margen; hace unos 460 millones de años, ya habían migrado unos 2000 kilómetros hacia el norte. Creemos que esos terrenos fueron desgajados de Gondwana porque la tracción de la placa que subducía bajo el margen de Laurencia causó la reapertura de la antigua sutura. La ubicación del océano Reico habría venido determinada por la existencia de una zona de debilidad cortical, generada en colisiones anteriores.

Bibliografía complementaria

USE AND ABUSE OF CRUST FORMATION AGES. N. T. Arndt y S. L. Goldsteinen en *Geology*, vol. 15, págs. 893-895; 1987.

MODELS OF RODINIA ASSEMBLY AND FRAGMENTATION. S. A. Pisarevsky, M. T. D. Wingate, C. M. Powell, S. Johnson y D. A. D. Evans en *Proterozoic East Gondwana: Supercontinent Assembly and Breakup*, dirigido por M. Yoshida, B. Windley y S. Dasgupta, págs. 35-55. The Geological Society, Special Publication 206; Londres, 2003.

HOW DO SUPERCONTINENTS FORM? J. B. Murphy y R. D. Nance en *American Scientist*, vol. 92, págs. 324-333; 2004.

ORIGIN OF THE RHEIC OCEAN: RIFTING ALONG A NEOPROTEROZOIC SUTURE? J. B. Murphy, G. Gutiérrez Alonso, R. D. Nance, J. Fernández Suárez, J. D. Keppie, C. Quesada, R. A. Strachan y J. Dostal en *Geology*, vol. 34, págs. 325-328; 2006.

Electrolitos ultrafinos

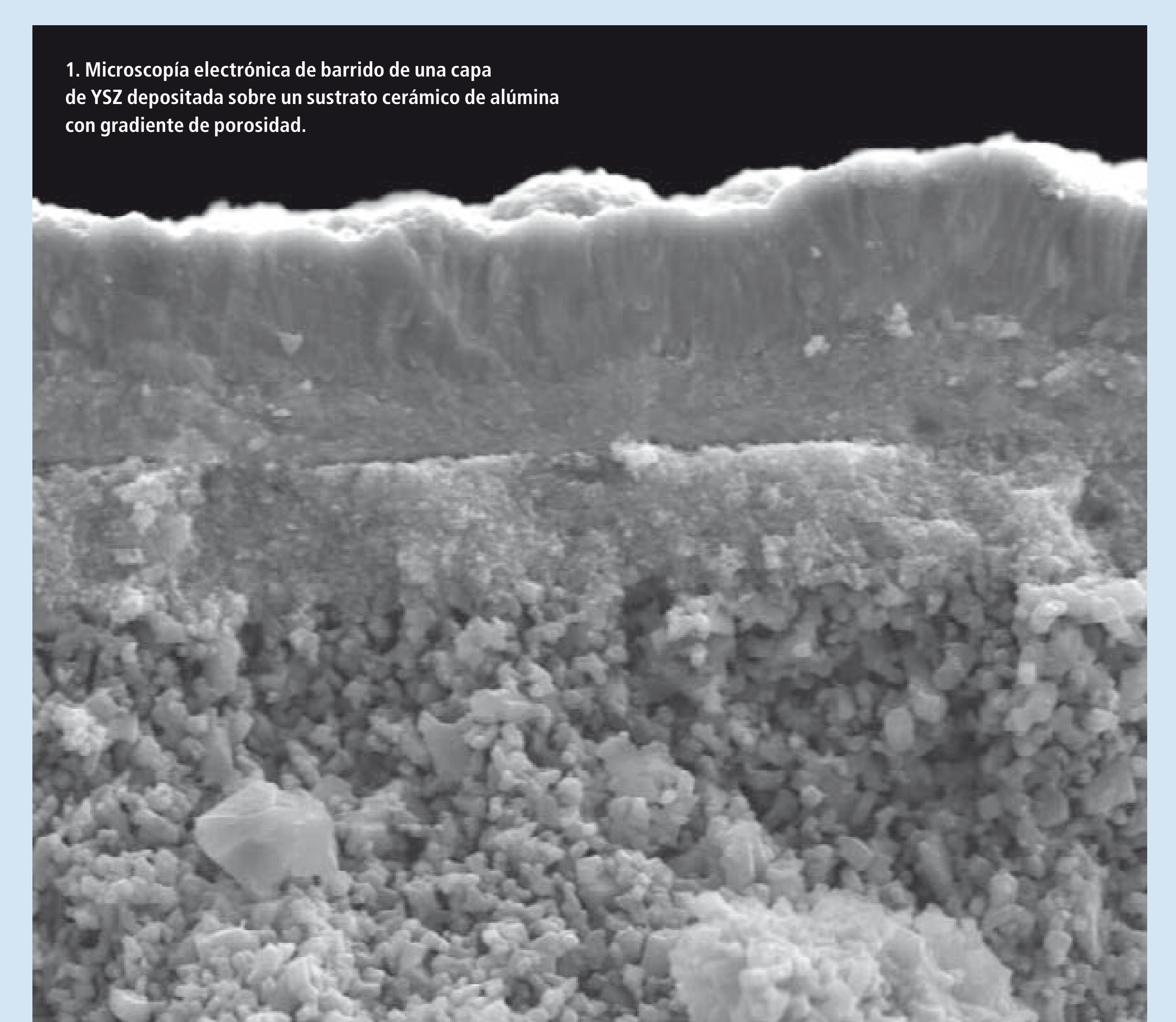
Gemma Garcia Alonso

Entre los dispositivos que ofrecen una nueva vía, más limpia y eficiente, para la explotación de la energía eléctrica destacan las pilas de combustible de óxido sólido. Uno de los electrolitos más utilizados en esas pilas es la circona estabilizada con itrio (YSZ, de sus siglas en inglés). Corresponde a un óxido de zirconio en el que una parte del zirconio se sustituye por itrio con el fin de generar vacantes aniónicas. Sus propiedades le confieren un gran potencial técnico: elevada estabilidad química y mecánica, y conductividad iónica pura en un amplio rango de temperaturas y presiones parciales de oxígeno.

Para mejorar las prestaciones de las pilas de combustible a temperaturas inferiores es necesario reducir el espesor de los electrolitos. En el último decenio, han empezado a desarrollarse técnicas de deposición que permiten obtener electrolitos densos con espesores inferiores a 10 micrometros. Suelen depositarse sobre uno de los electrodos que hace de soporte mecánico, generalmente el ánodo.

Los cermets (materiales compuestos cerámico-metal) de Ni-YSZ son los mas utilizados en la construcción del ánodo (en ocasiones se usa calcio en vez de itrio). En general, se obtienen mezclando óxido de níquel y el propio material de electrolito (YSZ). Al someterlos a una atmósfera reductora (como es el caso en las condiciones de trabajo de las pilas de combustible de óxido sólido en el ánodo), el óxido de níquel se reduce formando partículas de níquel conductor eléctrico y los poros necesarios para la difusión del oxígeno.

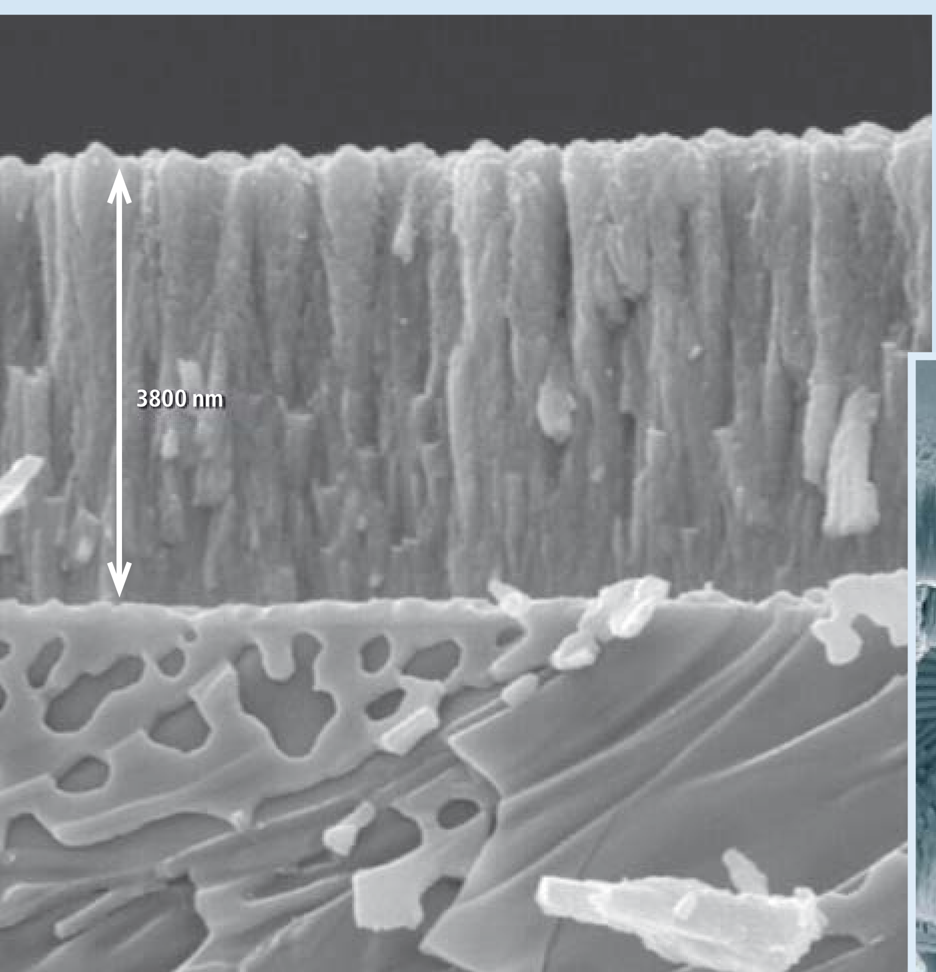
Una técnica novedosa, la deposición química en fase vapor mediante inyección pulsada de la solución obtenida a partir de precursores organometálicos, facilita la obtención de capas densas de gran calidad cristalina con alta velocidad de crecimiento sobre superficies densas o porosas. Ofrece una vía prometedora para la obtención de electrolitos sólidos de YSZ sobre sustratos porosos de tipo cermet. Las imágenes muestran algunos ejemplos de esos electrolitos ultrafinos.



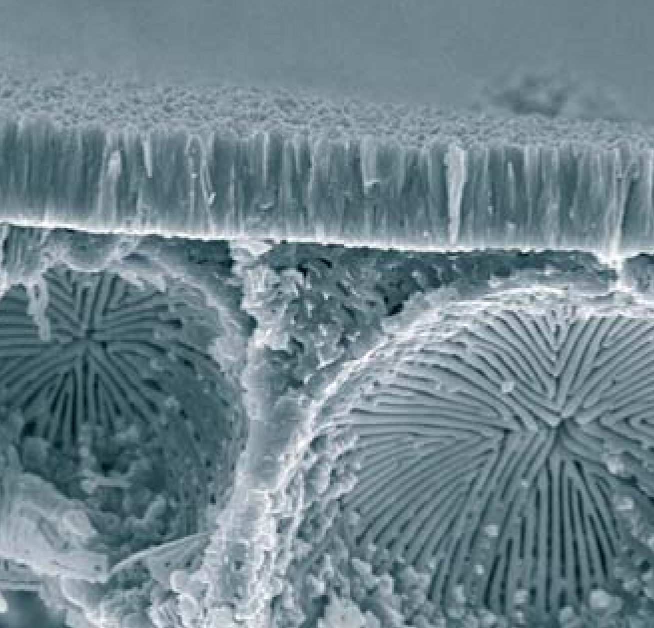
1. Microscopía electrónica de barrido de una capa de YSZ depositada sobre un sustrato cerámico de alúmina con gradiente de porosidad.

GEMMA GARCIA; FOTCIENCIA03/ICMAB-CSIC (*muestra defectuosa*)

2. Microscopía electrónica de transmisión de una capa de YSZ crecida sobre un sustrato monocristalino de alúmina. Se observan distintos regímenes de crecimiento (primero epitaxial y luego columnar).



3. Microscopía electrónica de barrido de una capa de YSZ depositada sobre un sustrato de NiO-CaSZ fundido mediante láser. A la izquierda, se observan las lamelas (paralelas al plano de la imagen) de CaSZ y de níquel, y los poros formados tras la reducción. Abajo, una muestra defectuosa: la fusión por láser ha producido burbujas, en cuyas paredes se distinguen las láminas de CaSZ intercaladas por poros y partículas de níquel.



Michael Wigler: Un díscolo frente a los mendelianos

Valiéndose de la teoría clásica sobre la herencia, los expertos han buscado sin éxito los genes responsables del autismo. Michael Wigler cree que ha descubierto el mecanismo en virtud del cual el trastorno persiste generación tras generación

Nikhil Swaminathan

Si se le pregunta a Michael Wigler acerca de la base genética del autismo, responde que no sirven los métodos clásicos de la genética para detectar mutaciones causantes de un trastorno en familias con varios miembros afectados. Aunque la mayoría de los expertos admite que el entorno influye en la aparición de la enfermedad, el autismo posee un fuerte componente genético: si de dos gemelos idénticos uno es autista, el otro tiene un 70 por ciento de probabilidades de padecer el trastorno, un factor de riesgo casi 10 veces mayor que el observado en gemelos no idénticos o en hermanos. Mas nada se ha conseguido tras largos años e ingentes sumas de dinero que se han empleado en la búsqueda de genes ligados al trastorno.

Según Wigler, del Laboratorio de Cold Spring Harbor en Long Island, la clave para identificar la base genética del autismo se halla en las mutaciones espontáneas, las alteraciones en la línea parental que se manifiestan como novedad en la descendencia. En 2006, demostró que ciertos fenómenos espontáneos intervenían en algunos casos de autismo. Formuló luego una controvertida teoría sobre la genética del trastorno. Sugiere que las mujeres, que padecen el autismo con una tasa cuatro veces menor que los varones, pueden ser portadoras del perfil genético de la enfermedad y transmitirlo luego a sus hijos.

Wigler sostiene que los estudios genéticos clásicos han fallado porque se han escogido familias con más de un hijo autista para buscar diferencias en una base en todo el código genético. Esas diferencias, que afectarían a la conectividad neural, corresponden a la adición, la deleción o la sustitución de una base; se denominan polimorfismos de un solo nucleótido (SNP, de las siglas en inglés).



MICHAEL WIGLER

PENSAMIENTOS ESPORADICOS: Propone que las mutaciones espontáneas, además de las mutaciones que siguen los patrones clásicos de la herencia mendeliana, explican el desconcertante comportamiento hereditario del autismo.

TRASTORNO MISTERIOSO: Los síntomas del autismo van desde deficiencias cognitivas hasta un comportamiento asocial y obsesivo. En EE.UU., afecta a uno de cada 150 niños.

TEJER UNA RED TUPIDA: Cree que su teoría unificada del autismo puede ayudar también a explicar la esquizofrenia, la depresión, la obesidad mórbida, la diabetes y otros trastornos genéticos complejos.

BRIAN MARANAN PINEDA

Descubrir SNP compartidos por personas autistas permitiría detectar individuos con un riesgo elevado de heredar la alteración o de transmitirla.

El problema es que casi nunca se han examinado los mismos lugares de los mismos genes: se han imputado loci en 20 de los 23 pares de cromosomas del genoma. En la opinión de Portia Iversen, madre de un chico autista de 15 años y fundadora de la asociación Curemos el Autismo Ya, la pista de los SNP ha llegado a un callejón sin salida.

Los que trabajan con SNP trataron de esquivar las críticas alegando que el autismo es un trastorno de gran complejidad, determinado por una suerte de "conjunción planetaria", es decir, que contribuyen cuatro o cinco loci y, si se da la configuración errónea de alelos en esos cuatro o cinco loci, se padecerá la alteración.

A Wigler, que durante tres decenios ha cosechado importantes éxitos en genética, no le basta esa justificación. En 1981, aisló la superfamilia de genes *RAS*, el primer grupo de oncogenes en ser identificado. En los años noventa desarrolló un método para muestrear segmentos del genoma, que facilitaba y abarataba la comparación del ADN. Empleó luego esa técnica de biochips, el análisis representacional de micromatrices de oligonucleótidos, para escrutar el ADN en busca de alteraciones que pudieran causar cáncer.

En su primera toma de contacto con el autismo, Wigler, en estrecha colaboración con Jonathan Sebat, también del Cold Spring Harbor, se propuso determinar la influencia de las variaciones en el número de copias, un tipo de mutación espontánea, en este trastorno. Esas mutaciones afectan al número de copias de un gen que posee una persona. Antes de que se secuenciara el genoma humano, los expertos creían que cada individuo poseía

dos alelos, o copias, de un gen: uno heredado del padre y otro de la madre.

En 2004, el grupo de Cold Spring Harbor halló que, incluso en individuos sanos, podía ocurrir que una copia de un gen faltara (o se añadiera) en el genoma, debido a reorganizaciones a gran escala del material genético. (Tales reorganizaciones se conocían desde hacía años; se les atribuían manifestaciones particulares de numerosos trastornos, entre ellos la enfermedad de Huntington.) Centrándose en familias con un solo miembro autista, demostraron en marzo de 2007 que hasta un 10 por ciento de los casos de autismo no heredado podrían deberse a variaciones espontáneas en el número de copias. Wigler y Sebat encontraron que las alteraciones estructurales correspondían sobre todo a deleciones, que dejaban al individuo con una copia de un gen particular y provocaban, en algunos casos, la disfunción de ese gen (haploinsuficiencia).



ROMPECABEZAS GENERACIONAL: algunas personas sanas podrían ser portadoras de genes del autismo, lo que permitiría explicar el patrón hereditario de este trastorno.

MICHAEL MACOR *San Francisco Chronicle/Corbis*

En julio de 2007, Wigler publicó un artículo que presentaba una teoría unificada sobre el autismo. Examinó los datos de familias con varios miembros autistas; consideró factores hereditarios y espontáneos. Se centró en las familias cuyos dos hijos mayores estaban afectados. Halló que el tercer hijo varón tenía un 50 por ciento de posibilidades de sufrir el trastorno; en el caso de una niña, el riesgo se reduce al 20 por ciento.

A partir de esos datos, Wigler desarrolló una hipótesis de dos niveles. La gran mayoría de las familias caen en la categoría de bajo riesgo, en la cual los hijos afectados poseen una mutación espontánea, ya sea una variación en el número de copias o una mutación puntual. En las familias de alto riesgo (que pueden llegar a albergar el 25 por ciento de todos los casos de autismo) el trastorno se manifiesta cuando un individuo no afectado, normalmente una mujer, es portador de una mutación esporádica y la trasmite en forma de alelo dominante. Si la descendencia es masculina, la probabilidad de desarrollar autismo ronda el 50 por ciento.

En la opinión de Deborah Levy, directora del laboratorio de investigación psicológica del Hospital McLean de la facultad de medicina de Harvard, la teoría de Wigler ofrece un nuevo marco para el estudio del trastorno. En vez de un gran número de genes con escasos efectos, se tiene un solo gen responsable; aunque son muchos los genes (hasta 100, según Wigler) que pueden desempañar esa función.

Wigler explica que algunos genes alterados o suprimidos de forma esporádica muestran una elevada penetrancia (proporción de individuos portadores de un genotipo que muestran el fenotipo esperado); ello conlleva un alto riesgo, sobre todo para los varones. Esas mutaciones insidiosas suelen desaparecer al cabo de dos o tres generaciones, pero el autismo probablemente persiste como fenotipo porque los portadores, en su mayoría mujeres, poseen genes modificadores que los protegen. No parece, sin embargo, probable que tales genes defiendan a la descendencia masculina. Según Wigler, las tasas de autismo son demasiado elevadas para atribuir la mayoría de los casos a mutaciones espontáneas. No podemos olvidar que convivimos con la evolución.

Si unos expertos consideran que el modelo de mutaciones espontáneas de Wigler ofrece una manera más simple de abordar la genética de la enfermedad, otros lo encuentran incompleto. Aducen éstos que la teoría no da cuenta de los casos de familias con un niño autista en las cuales los parientes de segundo o tercer grado también se ven afectados, o en las cuales los parientes de primer grado muestran síntomas leves del trastorno. El modelo tampoco explica por qué las niñas no desarrollan el autismo con la misma frecuencia que los niños.

Wigler cree que una estadística más completa ayudaría a demostrar su teoría. Así, la discrepancia entre niños y niñas quedaría explicada si los modificadores genéticos fueran específicos del sexo, un efecto que se manifestaría en madres normales que tuvieran una niña autista. Wigler admite que no es la clase de teoría con la que uno se queda tranquilo porque resuelve el misterio, sino de las que te despiertan por la noche para que sigas trabajando.

Wigler recuerda una película que le causó un gran impacto: *Alejandro Magno*, la historia del conquistador macedonio rodada por Robert Rossen en 1956, a la que su abuelo le llevó a ver cuando contaba nueve años. En ella, Alejandro se enfrenta al nudo gordiano, una cuerda con una lazada mítica sobre la que pesaba el augurio de que quien la desatara conquistaría Asia. En vez de tratar de desenredar la maraña, Alejandro desenfunda su espada y corta la cuerda.

Wigler aprendió de esa historia que a veces no vemos la solución a un problema porque no lo miramos directamente. Pero sólo con más datos se verá si sus ideas sobre el autismo van derechas a la cuestión.

El cambio climático después de Bali

Con técnicas de coste asequible se puede prevenir el calentamiento global fomentando, al mismo tiempo, el crecimiento económico

Jeffrey D. Sachs

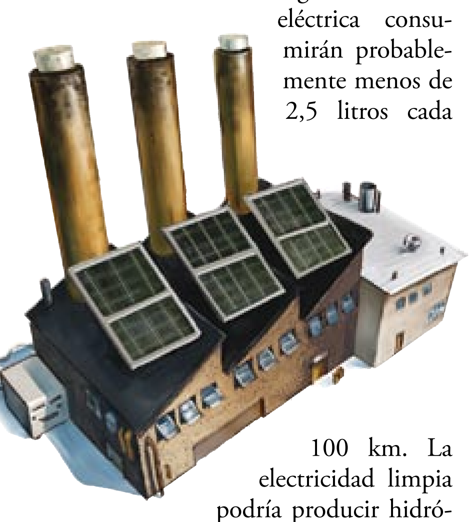
El acuerdo, al que se llegó en Bali el pasado diciembre, de iniciar dos años de negociaciones sobre el cambio climático fue una buena noticia, un ejemplo raro de cooperación internacional en un mundo que parece sumido en una espiral de conflictos. Los más cínicos podrían señalar que el único avance fue llegar al acuerdo de seguir hablando. Su cinismo todavía podría confirmarse. Con todo, se ha avanzado en el entendimiento de que tomar medidas serias para controlar el clima es factible a un coste modesto. Una convergencia digna de reseñar.

Las cuentas son cada vez más claras. Si los ingresos de las naciones ricas siguen aumentando y las naciones pobres continúan desarrollándose, acortándose las diferencias entre unas y otras, para 2050 la economía global podría haberse multiplicado por seis y el consumo de energía, aproximadamente por cuatro. Actualmente, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) generadas por el hombre son de alrededor de 36.000 millones de toneladas anuales, de las cuales 29.000 millones se deben a la quema de combustibles fósiles y a los procesos industriales, y en torno a otros siete mil millones resultan de la deforestación tropical.

En términos generales, el incremento del nivel de CO_2 por cada 30.000 millones de toneladas emitidas es de alrededor de dos partes por millón (ppm). La concentración actual de CO_2 en la atmósfera se cifra en torno a 380 ppm, cuando a comienzos de la era industrial, hacia 1800, era de 280 ppm. Así, para llegar a las 440 ppm hacia mediados de siglo —un nivel perfectamente alcanzable y todavía "saludable" en términos de sus probables consecuencias para el cambio climático, pero 60 ppm superior al actual— la acumulación de emisiones en la atmósfera debería mantenerse alrededor de los 900.000 millones de toneladas, o en torno a los 21.000 millones de toneladas al año de promedio hasta 2050. Este objetivo podría alcanzarse poniendo fin a la deforestación y reduciendo un tercio nuestras emisiones actuales producidas por los combustibles fósiles.

¿Puede la economía mundial consumir cuatro veces más energía primaria reduciendo al mismo tiempo una tercera parte de las emisiones?

Parece que existe una estrategia básica prometedora: producir una electricidad prácticamente libre de emisiones a través de la movilización masiva de energía solar y nuclear y la captación y almacenamiento de dióxido de carbono en centrales de combustión de carbón. Con una red eléctrica general limpia, la mayor parte de las emisiones restantes puede también controlarse. En menos de un decenio, los automóviles híbridos recargables en la red eléctrica consumirán probablemente menos de 2,5 litros cada 100 km. La electricidad limpia podría producir hidrógeno para vehículos impulsados por pilas de combustible y reemplazar las calderas domésticas. A los mayores emisores industriales se les podría instar (o incitar por medio de impuestos y permisos negociables) a que capturen cierta cantidad de sus emisiones de CO_2 o reconviertan parte de sus procesos para seguir funcionando con pilas eléctricas y electricidad primaria limpia.



La captación y almacenamiento de carbono en centrales eléctricas de combustión de carbón sólo incrementaría el coste de la electricidad tres céntimos de dólar por kilowatt-hora, según un informe especial del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. La conversión total de EE.UU. a energía solar puede implicar un incremento del coste de alrededor de cuatro céntimos por kilowatt-hora, y la electricidad tendría un coste total del orden de ocho a nueve céntimos de dólar por kilowatt-hora. Con este incremento, que supone mucho menos del uno por ciento de los ingresos anuales mundiales, se produciría la conversión a una red eléctrica limpia. En el resto de los sectores el coste será igualmente bajo. Con el ahorro de combustible que supondrán los coches de bajas emisiones se podría fácilmente sufragar las baterías o pilas de combustible. Calentar los edificios de viviendas con electricidad (o un sistema mixto) en vez de calderas proporcionará en general un ahorro neto, especialmente si se combina con la mejora del aislamiento.

Las negociaciones de Bali tendrán éxito si el mundo se preocupa también de apoyar la pronta adopción de técnicas de bajas emisiones. Ni las cuestiones de culpabilidad, ni el reparto de los costes, ni la elección de los mecanismos de control son tan importantes como el rápido desarrollo técnico y su despliegue, respaldados por un mecanismo de control elegido por cada país.

Si las técnicas menos contaminantes resultan de bajo coste, como parece verosímil, los países ricos podrán permitirse limpiar sus propios sistemas de energía y, a la vez, cargar con parte de los costes de los países pobres para que puedan realizar las conversiones necesarias. El control climático no es un juego moral. Es principalmente un reto técnico práctico y viable que, de llevarse a cabo correctamente, se puede conjugar con las necesidades y aspiraciones de una economía global en crecimiento.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Cultos funerarios mayas

Los mayas actuales conservan ritos funerarios de una cultura milenaria basada en la continuidad cíclica entre la vida y la muerte, la creación y la destrucción

Vera Tiesler



CALCA DE LA PARTE CENTRAL Y DERECHA DEL VASO POLICROMO KERR 1377; REDIBUJADO POR VERA TIESLER

El año 1492 marca el primer contacto entre la Europa renacentista y el Nuevo Mundo. Pero hasta el inicio del siglo XVI los exploradores españoles no llegaron a conocer las altas culturas que ocupaban el sur de México y Centroamérica. Cuando en 1517 Francisco Hernández de Córdoba puso el pie en Yucatán, quedó maravillado. Descubrió la civilización maya, distinta de todas las conocidas por los europeos.

El origen de los mayas se remonta al segundo milenio antes de Cristo. Comparten numerosos elementos culturales con el resto de Mesoamérica: creencias escatológicas, culto funerario, escritura, calendario, sistema de cómputo vigesimal, construcciones de basamentos piramidales, juegos de pelota y una agricultura intensiva centrada en el maíz, frijol, calabaza y chile.

El territorio maya corresponde a la mayor área cultural de la Mesoamérica prehispánica. Cubre el sudeste del territorio mexicano actual, toda Guatemala, Belice, Honduras y El Salvador; comunica con el océano Pacífico, el golfo de México y el Caribe.

Cosmología

En comparación con las mitologías clásicas europeas, sabemos muy poco de la antigua cosmovisión de los mayas. Sabido es que, con la conquista, se produjo una fatal destrucción del legado escrito. Apenas se conservan libros prehispánicos sobre la visión que del cosmos tenía este pueblo milenario. Los investigadores recurren a otras fuentes: las crónicas de Indias, obras de arte e inscripciones prehispánicas y tradiciones orales modernas, reminiscencias de las ideas y las creencias de la antigüedad.

A diferencia de la cultura occidental, basada en el concepto de un "destino final", los mayas admitían un curso del universo y cuanto contenía. Pensaban que la vida y la muerte, la creación y la destrucción, coexistían y se complementaban en una necesaria oposición dinámica. Ese eterno devenir se desarrollaba en un espacio cósmico estratificado, mantenido por las ramas, el tronco y las raíces de una ceiba gigantesca, árbol sagrado considerado *axis mundi* (eje del mundo). En esa estructura, las capas celestes yacían sobre la superficie terrestre y ésta se asentaba sobre las esferas del inframundo.

En esa cosmología, también el centro de la Tierra, o *xibalba*, ocupaba un lugar definido: un sitio obscuro donde gobernaban los señores de la noche. Ahí residía el dios esqueletizado, o señor de la muerte, *Yum Cimih*. Daban acceso al inframundo ríos, ojos de agua, cenotes,

CONCEPTOS BASICOS

- Los antiguos mayas concebían el mundo como un cosmos estratificado. En el centro yacía el *xibalba* (inframundo), un obscuro lugar subterráneo al que se accedía a través de ríos, cuevas y cenotes.
- Los muertos habitaban en el *xibalba* y ejercían su poder sobre los vivos. Por ello se conmemoraban y veneraban mediante ceremonias, ofrendas y sacrificios.
- La bioarqueología y la arqueología funeraria estudian los ritos funerarios mayas prehispánicos a partir de sus vestigios materiales. Ambas han arrojado datos novedosos sobre la vida y la muerte de jefes mayas, como lo demuestra el estudio del mausoleo de Janaab´ Pakal en Palenque.



MERLE GREENE, REDIBUJADO POR MIRNA SANCHEZ

1. LA EXUBERANTE COSMOLOGIA MAYA aparece labrada en la lápida mortuoria que cubría el sarcófago del gobernante Janaab' Pakal (*centro*).

cuevas rocosas y las cavernas de las cadenas montañosas detrás del horizonte.

Muerte, luto y conmemoración

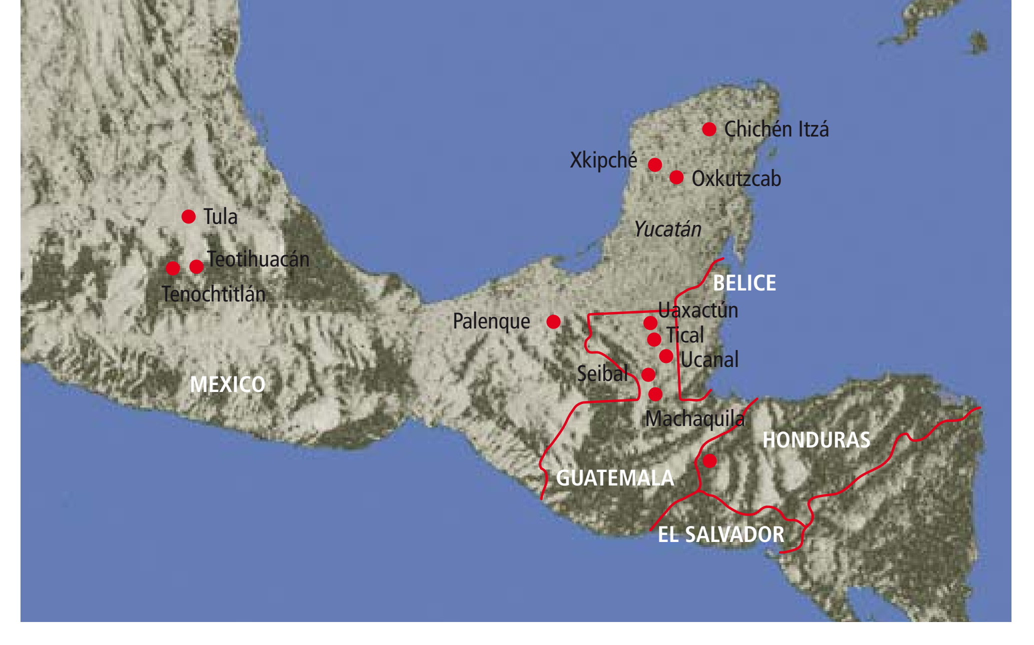
Los mayas creían en la vida después de la muerte, como parte fundamental de un continuo cambio perenne de generación, destrucción y renovación. Según el mito quiché del Popol Vuh, la cabeza del difunto gemelo Hunahpú se transformó en un jícaro; en esa forma fecundó a una joven y de ese modo resucitó. En otra ocasión, los huesos molidos de Hunahpú y Xbalanqué "germinaron" en el fondo de un río, de donde renacieron los dos.

Los mayas quichés actuales de Chichicastenango creen que el alma del muerto se reúne con los ancestros; se asegura así la renovación de la vida. Bajo esa creencia subyace la idea quiché de la continuidad cíclica de la vida, contenida en el término *Jaloj-K'exoj*. Esa expresión constituye la parte central de numerosas oraciones tradicionales. Expresa dos tipos de cambio: el primer término, *Jal*, designa las transformaciones que se experimentan a lo largo de la vida (nacimiento, crecimiento y vejez); el segundo, *K'ex*, se refiere al cambio generacional, a la renovación cíclica de la vida. Para la vida individual, ese cambio implica la sustitución, la muerte y la conversión en ancestro. En conjunto, los dos cambios renuevan y perpetúan la vida y, con ello, la sociedad.

Con el concepto de *Jaloj-K'exoj* guarda también relación la creencia de que la vida nace de la muerte. Los quiché lo expresan metafóricamente cuando comparan el desarrollo de la vida humana con el crecimiento de las plantas: las semillas de maíz corresponden a los "enterrados" o "pequeños cráneos", los vástagos de una planta son "caras" que han salido y el niño recién nacido "retoña" o "regresa".

La continuidad simbólica entre la vida y la muerte se manifiesta en el devenir individual después del fallecimiento. Los mayas actuales de Yucatán siguen considerando la muerte como el paso a otro estado. Durante esa transición, y también después, permanecen los lazos directos entre los familiares y el difunto, al que se apoya en su trayecto al *xibalbá*. Durante el tránsito, la forma de existencia del finado se altera sólo al desintegrarse en sus componentes vitales: el espíritu inmortal (*teyolía* o *chu'lel*) y el cuerpo carnal (*puczikal*), que se desvanece y muere al igual que el *nagual* o *alter ego* animal del desvanecido.

Las tradiciones funerarias del norte de Campeche recogen las antiguas creencias de continuidad entre vida y muerte, entre vivos y muertos. Se reflejan en la forma de comunicación con los muertos, en el tratamiento que reciben al ser enterrados y en las exhumaciones que se realizan, dos o tres años después, para limpiar sus osamentas y colocarlas en osarios abiertos. Para los campechanos, los osarios son como casitas: "...Allá se meten los huesos. Depende de uno si se le pone puertita, ya sea de vidrio o de madera; pero cuando le vaya a



2. EL TERRITORIO MAYA cubre el sudeste del territorio mexicano actual, toda Guatemala, Belice, Honduras y El Salvador.

rezar se abre para que le dé el aire. Las casitas son para toda la familia; también se pueden poner amigos".

Los cuidados en honor a los muertos se reinician cada noviembre, mes de convivio con los familiares que da comienzo con el Día de los Fieles Difuntos y termina treinta días después con una fiesta de despedida. Durante ese tiempo, se mandan y reciben mensajes de los muertos que están de visita. Los familiares se preparan para la ocasión: limpian y "visten" las osamentas; reparan y pintan las tumbas. La arquitectura de las criptas individuales y colectivas guarda semejanza con las fachadas de las casas, lo que confiere a los cementerios locales un aire de pequeñas ciudades mortuorias.

Prácticas funerarias

Según las antiguas creencias, el finado, ahora en su estado incorpóreo, retenía ciertos poderes. Su cuerpo se consideraba una reliquia, ya que constituía el punto de enlace entre su nuevo lugar de permanencia y la tierra; se hallaba entre los vivos y los muertos. Fray Diego de Landa afirmaba, en referencia a los mayas yucatecos del siglo XVI, que los vivos proporcionaban maíz, bebida y moneda a sus difuntos con la finalidad de que no les faltase nada en la otra vida. El lugar del enterramiento solía ser la misma residencia, antes compartida y ahora ocupada por los familiares supervivientes.

El luto y la conmemoración de los antepasados hacen patente la importancia que su recuerdo tenía para la vida cotidiana, sobre todo en una sociedad regida por la estructura familiar y los lazos de parentesco. La memoria colectiva otorgaba una identidad a cada descendiente y una identificación con el grupo.



3. TRONCO ESPINOSO DE UNA CEIBA, árbol considerado el eje del mundo (*axis mundi*) en la mitología maya.

EL MAUSOLEO DEL REY PAKAL

En los años cincuenta del siglo pasado, el equipo de arqueólogos liderado por Alberto Ruz Lhuillier descubrió en Palenque el monolito funerario que abriga los restos mortales del monarca *K'inich Janaab' Pakal*. La minuciosa excavación del núcleo del Templo de las Inscripciones condujo al que se considera uno de los grandes hallazgos arqueológicos mundiales. Las investigaciones epigráficas indican que Pakal nació en 603 y fue entronizado a los doce años. Tras dominar la escena política durante más de medio siglo, falleció a los ochenta años para unirse con sus ancestros en un altar en la casa de las nueve figuras, que adecuó su hijo y sucesor al trono Chan Balam.

Los preparativos para el funeral del rey comenzaron años antes de su muerte. El mismo Pakal supervisó la construcción del mausoleo en sus primeras fases. Su hijo encargaría después la decoración de las paredes y el monumental sarcófago. El cuerpo del rey se bañó de forma alternada con cinabrio rojo y materiales orgánicos de tono negruzco. Portaba consigo su rico atuendo personal, confeccionado en jadeíta y concha: un pectoral, aretes esgrafiados, pulseras y anillos; le cubría la cara una máscara de teselas del mismo material. Abundantes utensilios y objetos suntuarios le acompañaron en su última morada. Una vez cerrada la cavidad, el acceso monolítico se selló con una ofrenda de víctimas sacrificiales. Frente a la entrada de la cámara funeraria se halló un arca que contenía los restos articulados de, por lo menos, cinco personas.Los estudios bioarqueológicos de la osamenta de Pakal no hallaron vestigios de enfermedades carenciales. El joven aspirante al trono creció, pues, sin privaciones y en unas condiciones de vida favorables. Gozaba de una buena alimentación y llevaba una vida sedentaria. Sin embargo, se le detectó osteoporosis degenerativa crónica, asociada a un proceso artrítico de la espina dorsal, que le habría causado dolor de espalda durante los últimos años de vida.

RESTOS MORTALES de *K'inich Janaab' Pakal*, gobernante de Palenque. Una capa de cinabrio les confiere esta intensa coloración rojiza.

PATRICIA TAMES (*fotografía*)

Los vestigios materiales que se han hallado en los yacimientos mayas prehispánicos ponen de manifiesto la riqueza de los ritos mortuorios. Subrayan, además, la importancia que el culto a los muertos revestía para los mayas. Diversas en número y calidad, las ofrendas del interior de las sepulturas constan de objetos de atuendo y de uso cotidiano. Los espacios mortuorios (desde los pozos sencillos excavados en la tierra, hasta las criptas y las cámaras funerarias ricamente ataviadas del primer milenio después de Cristo) se distribuyen sobre todo debajo de las áreas residenciales. También las cuevas, los ojos de agua, los cenotes y otras cavidades naturales servían como receptáculos de cuerpos y osamentas.

El culto a los antepasados no se extendía de forma simétrica a todos los difuntos, sino que privilegiaba a los miembros regentes, como chamanes y gobernantes. Esos jerarcas se consideraban dotados de poderes especiales, pues fungían como intermediarios entre sus descendientes y los dioses, para, incluso después de su deceso, asegurar el bienestar y la continuidad del grupo. Las pompas fúnebres celebradas en ocasión de la muerte de un jefe local y su mismo lecho mortuorio en los aposentos del poder de los centros urbanos no responden sólo a una motivación religiosa, sino también a una estrategia para la legitimación de la supremacía política y la reafirmación de las condiciones sociales del grupo al frente de la sociedad.

Las edificaciones funerarias mayas más elaboradas datan del primer milenio después de Cristo, época de auge social y político que terminó con el colapso de las estructuras de poder y el ulterior abandono de zonas extensas de la Tierras Bajas Centrales. De ese tiempo se conocen un gran número de estelas conmemorativas y cámaras funerarias; algunas contienen féretros monolíticos. Los jefes solían sepultarse amortajados y cubrirse con pigmento rojo antes de enterrarlos en la tumba. Ahí se les agregaba una abundante cantidad de objetos suntuarios y, con frecuencia, el cuerpo de acompañantes sacrificiales.

Sacrificios humanos

A la muerte natural le seguían el luto y la conmemoración de familiares y deudos. La muerte ritual y los tratamientos postsacrificiales, en cambio, tenían otra connotación. El difunto cobraba vida al fungir como intermediario con lo sagrado. Las prácticas sacrificiales mayas anteceden en más de un milenio a las toltecas y aztecas. Al igual que para los grupos del Altiplano Central mexicano, el sacrificio humano era para los mayas la máxima expresión religiosa, el mejor medio

4. **VERTEBRAS CERVICALES HUMANAS halladas en los aposentos reales de la metrópolis clásica de Calakmul, en Campeche. A la izquierda, tercera vértebra cervical con corte horizontal que indica una posible decapitación. La vértebra de la derecha presenta otro tipo de marcas antropogénicas: cortes por deslizamiento sucesivo que evidencian un desprendimiento póstumo de partes blandas.**





VERA TIESLER; PROYECTO ARQUEOLOGICO CALAKMUL (INAH)

para obtener el beneplácito y la intervención de los dioses, y garantizar así el bienestar de la comunidad. El sacrificio consistía en la destrucción de la vida misma, la donación de las esencias vitales y la invocación de lo sagrado.

Según los cronistas, las víctimas solían ser esclavos, prisioneros de guerra, huérfanos o hijos de los propios miembros de la comunidad, que eran entregados para el sacrificio. La preparación de la ceremonia culminante podía durar varios meses. La ejecución se realizaba por extracción del corazón, estando la víctima en posición supina, o decapitación. Otras formas de matar, menos documentadas, correspondían a la lapidación, el ahogamiento y la muerte a saetazos. Tras la ejecución, el cuerpo de la víctima —ahora parte de lo sagrado— podía seguir siendo objeto de ritos póstumos.

Sabemos por la iconografía y las marcas antropogénicas halladas en restos humanos, que los mayas desollaban, descarnaban y desmembraban a algunas víctimas. Según De Landa y Sánchez de Aguilar, los fragmentos de los cuerpos se distribuían entre los sacerdotes; luego se enterraban frente a los templos y adoratorios, se abandonaban en el monte o se arrojaban en pozos secos, cenotes y cuevas.

Arqueología mortuoria

¿Cómo investigar los ritos funerarios mayas prehispánicos? ¿De qué nos valemos para reconocer la muerte ritual en sus múltiples facetas y expresiones, tangibles e intangibles? En la arqueología funeraria mayista, interdisciplinaria, confluyen la arqueología, la antropología física, la historia del arte y la epigrafía (estudio de inscripciones y glifos).

En el área maya, la investigación de los ritos funerarios prehispánicos se enfrenta a un estado de conservación de los restos humanos muy precario. De ahí el interés de los estudios tafonómicos, que evalúan los factores extrínsecos e intrínsecos que influyen en la descomposición de los cuerpos. Se ha incrementado, además, la investigación de los complejos funerarios desde el enfoque novedoso de la "bioarqueología", que estudia los restos humanos en su contexto, y desde una



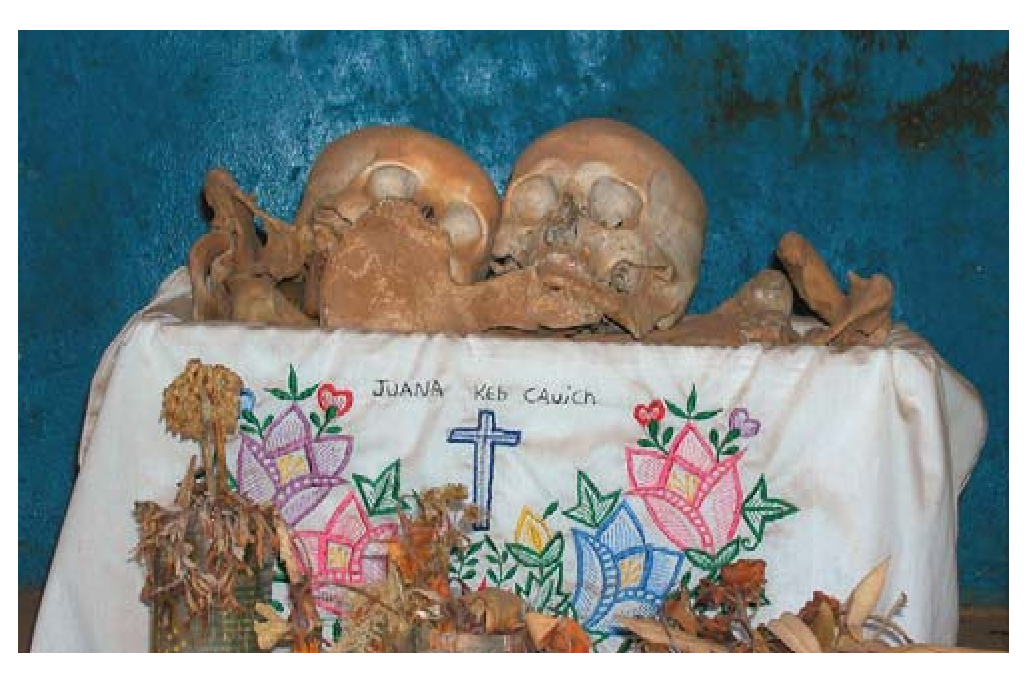
5. LOS TRES TEMPLOS DE PALENQUE fueron empleados por la elite como lugares de culto y sepultura. Al frente, el templo de las Inscripciones.

óptica biocultural. El marco teórico de esa disciplina requiere la estrecha colaboración de especialistas y el aprovechamiento de los datos extraídos de los trabajos histológicos y moleculares. El desarrollo de la bioarqueología está cosechando resultados e interpretaciones cada vez más atractivos. La reciente recreación de los linajes dinásticos se ha basado en la epigrafía.

Añádase que el estudio forense ha permitido perfilar la biografía de los soberanos de Calakmul, Copán y Tikal. Arrojan luz no sólo sobre aspectos específicos de su vida (lugar de nacimiento, residencia, enfermedades y aspecto físico), sino también sobre las pompas fúnebres que se celebraron en su honor y conmemoración.

El mausoleo del rey Pakal

El estudio del mausoleo de Janaab' Pakal de Palenque marca el ritmo de los avances en nuestro conocimiento de la vida y la muerte en la sociedad maya. El descubrimiento, en los años cincuenta del siglo pasado, del monolito funerario que abriga los restos mortales de Pakal se considera uno de los grandes hallazgos



6. LAS OSAMENTAS de una mujer y un hombre comparten el espacio de un osario en Pomuch, Campeche. Sus familiares las han "vestido" con una tela bordada con coloridos motivos florales que lleva el nombre de la difunta.

La autora

Vera Tiesler obtuvo el doctorado en antropología por la Universidad Nacional Autónoma de México. Complementó su formación con estudios de historia, medicina y antropología física. Desde 2000 es profesora investigadora en la facultad de ciencias antropológicas de la Universidad Autónoma de Yucatán en Mérida. Centra su trabajo en la paleodemografía, histología y patología, prácticas bioculturales, tafonomía y ritos funerarios mayas.

7. **LOS CEMENTERIOS CAMPECHANOS que se encuentran a lo largo del Camino Real entre Campeche y Mérida constituyen un verdadero hogar para los difuntos y un lugar de convivio con los familiares. Las criptas y las fachadas de los osarios les confieren el aspecto de ciudades en miniatura. En la fotografía, el cementerio de la pequeña comunidad de Poc-Boc.**



arqueológicos mundiales. La minuciosa excavación del núcleo del Templo de las Inscripciones de Palenque condujo al equipo de arqueólogos liderado por Alberto Ruz Lhuillier hasta la monumental cámara funeraria.

Unos veinte años después de ese descubrimiento, la epigrafía descifraba las inscripciones que asignaban nombre y cronología vital al dignatario. Según éstas, *K'inich Janaab' Pakal* nació en 603 y fue entronizado a los doce años. Tras dominar la escena política durante más de medio siglo, falleció a los ochenta años.

Los preparativos para el funeral de Pakal comenzaron años antes de su muerte. El mismo supervisó la construcción del mausoleo en sus primeras fases. Después, su hijo y sucesor al trono, Chan Balam, encargaría la decoración de las paredes y del monumental sarcófago que hoy se reconoce por su elegante ejecución y simbología. En su última morada en la cámara de las nueve figuras, acompañaron a Pakal abundantes utensilios y objetos suntuarios.

Una vez cerrada la cavidad, el acceso monolítico se selló con una ofrenda de víctimas sacrificiales, que habrían de acompañar al semidivino ancestro Janaab' Pakal. Frente a la entrada de la cámara funeraria en el Templo de las Inscripciones se halló una enigmática arca de piedra sellada. La excavación abrió el contenido de la misma: los restos articulados de por lo menos cinco personas, adultos y menores de edad, acomodados apretadamente en su interior para acompañar al difunto Pakal.

Los estudios bioarqueológicos de la osamenta confirmaron la avanzada edad de Pakal, asentada en las inscripciones. No se hallaron vestigios de enfermedades carenciales. El joven aspirante al trono creció, pues, sin privaciones y en unas condiciones de vida favorables. Gozaba de una alimentación equilibrada y llevaba una vida sedentaria. Sin embargo, se le detectó osteoporosis degenerativa crónica, asociada a un proceso artrítico de la espina dorsal que le habría causado dolor de espalda durante los últimos años de vida.

Este breve recorrido por la muerte, el luto y la conmemoración entre los mayas nos ha permitido vislumbrar la riqueza y creatividad de sus ritos funerarios, al tiempo que muestra la integración de los mismos en los códigos sociales e ideologías.

Bibliografía complementaria

COSTUMBRES FUNERARIAS DE LOS ANTIGUOS MAYAS. Alberto Ruz Lhuillier. Universidad Nacional Autónoma de México; México, D.F., 1991.

LIVING WITH THE ANCESTORS. KINSHIP AND KINGSHIP IN ANCIENT MAYA SOCIETY. Patricia A. McAnany. University of Texas; Austin, 1995.

ANTROPOLOGIA DE LA ETERNIDAD: LA MUERTE EN LA CULTURA MAYA. Dirigido por Andrés Ciudad Ruiz, Mario Humberto Ruz Sosa y María Josefa Iglesias Ponce de León. Sociedad Española de Estudios Mayas/Universidad Nacional Autónoma de México, Madrid, 2003.

K'INICH JANAAB' PAKAL DE PALENQUE. VIDA Y MUERTE DE UN GOBERNANTE MAYA. Vera Tiesler y Andrea Cucina. Universidad Nacional Autónoma de México/Universidad Autónoma de Yucatán; México, D.F., 2005.

¿Qué función cumple la sustancia

R. Douglas Fields

CONCEPTOS BASICOS

- La sustancia blanca, que se consideraba un tejido pasivo, participa de manera activa en el aprendizaje y las disfunciones cerebrales.
- La sustancia gris (neuronas) es responsable del razonamiento y el cálculo mental. La sustancia blanca (axones recubiertos de mielina) controla las señales compartidas por las neuronas; coordina el trabajo en equipo de las regiones del cerebro.
- Una nueva técnica de resonancia magnética, la tractografía por tensor de difusión, muestra la sustancia blanca en acción. Pone de relieve la función de la misma, subestimada hasta ahora.
- Cuando nacemos, la mielina está sólo parcialmente formada; se desarrolla luego de modo gradual hasta la mitad de la segunda década de vida. El ritmo y la compleción de la mielinización influyen en el aprendizaje, el autocontrol y ciertas enfermedades mentales como la esquizofrenia, el autismo y la mitomanía.

Imagínese la posibilidad de observar a través del cráneo para averiguar qué es lo que hace que un cerebro sea más inteligente que otro. O descubrir si ciertos rasgos ocultos podrían favorecer la esquizofrenia o la dislexia. Una nueva técnica de formación de imágenes está arrojando luz sobre la fisiología cerebral. Los resultados revelan un fenómeno sorprendente: la inteligencia y varios trastornos mentales podrían depender de conexiones cerebrales constituidas exclusivamente de sustancia blanca.

La sustancia gris corresponde al lugar donde se elaboran los cálculos mentales y se almacenan los recuerdos. Constituye la capa superficial del cerebro; consta de somas neuronales densamente agrupados (la parte con capacidad de decisión de las neuronas). Debajo de la misma se encuentra la sustancia blanca, que ocupa casi la mitad del cerebro humano, una proporción menor en otros animales. La sustancia blanca está formada por millones de vías de comunicación, cada una compuesta por un cable largo e independiente, el axón, cubierto por una sustancia blanca y grasa: la mielina. A la manera de las líneas principales de una red telefónica nacional, esos cables blancos comunican las neuronas de una región del cerebro con las de otras regiones.

Durante decenios, los neurocientíficos han mostrado escaso interés por la sustancia blanca. Consideraban que la mielina era una simple vaina aislante y los cables que ceñían, meras vías pasivas. Las teorías sobre el aprendizaje, la memoria y los trastornos mentales se centraban en los fenómenos moleculares que ocurrían en el interior de las neuronas y en las sinapsis, los diminutos puntos de contacto entre éstas.

Los expertos se están percatando ahora de que han subestimado la función de la sustancia blanca en la transmisión de información entre regiones cerebrales. Nuevos estudios revelan que la extensión de la sustancia blanca varía de un sujeto a otro en razón de sus experiencias mentales o a causa de ciertas disfunciones. También experimenta cambios conforme el individuo aprende o practica una destreza; por ejemplo, tocar el piano. Las neuronas de la sustancia gris ejecutan las actividades mentales y físicas; la sustancia blanca participaría en la adquisición de habilidades mentales y sociales, y explicaría la dificultad que presentan los perros viejos en aprender nuevos trucos.

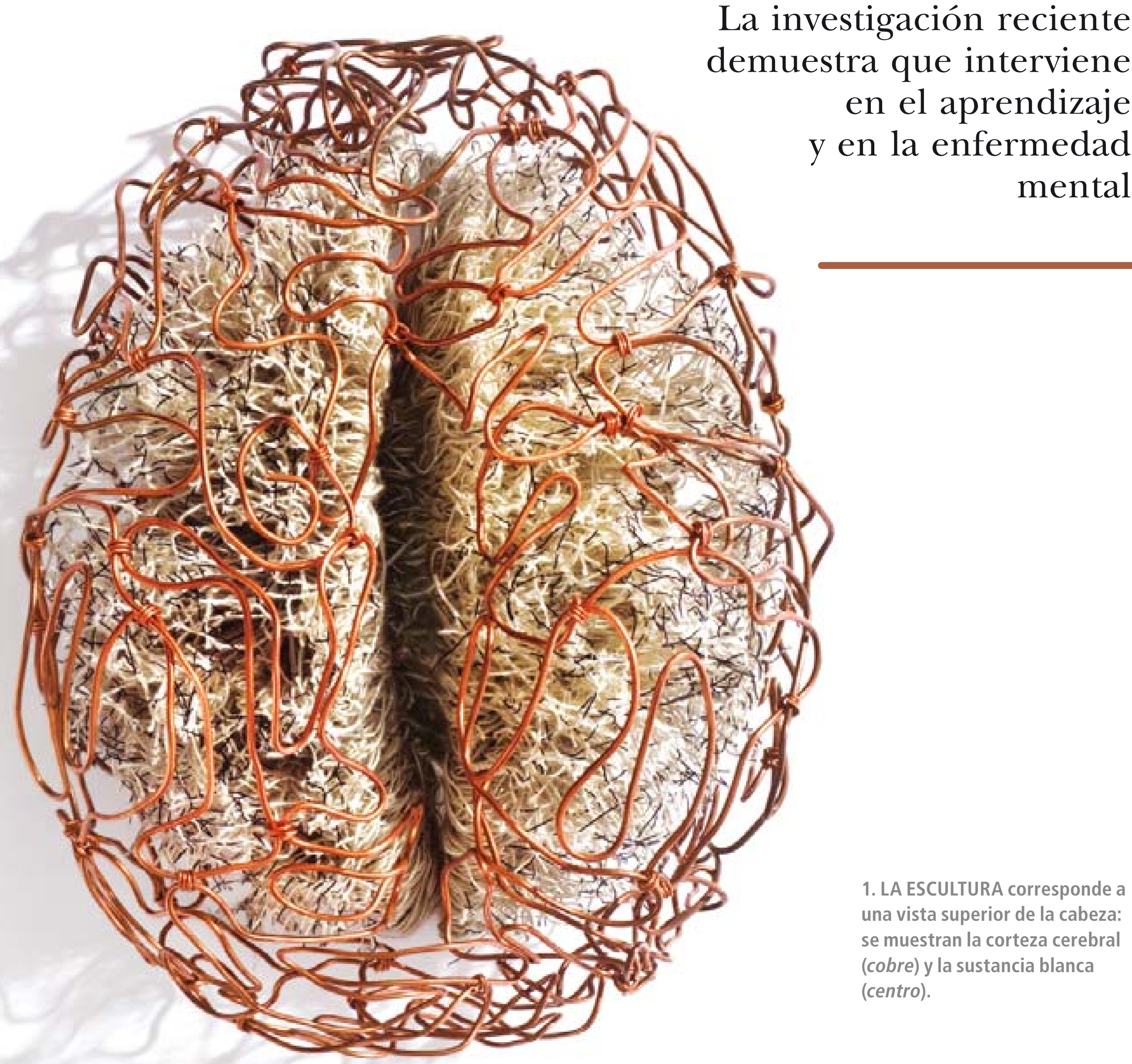
Estimulación de la mielinización

La mielina, que confiere a la sustancia blanca su color, ha constituido una fuente de misterios. Durante más de un siglo, los científicos han venido examinando las neuronas a través del microscopio: observaban unas fibras largas, los axones, que se extendían desde un soma neuronal hasta otro vecino, de forma parecida a un dedo alargado y estirado. Cada axón estaba cubierto por un gel cristalino grueso. Los anatomistas supusieron que la capa grasa debía aislar los axones, igual que el revestimiento de goma de un cable de cobre. No obstante, un gran número de axones, sobre todo los más pequeños, carecían de cubierta. Asimismo, a lo largo de las fibras aisladas, aproximadamente a cada milímetro, aparecían interrupciones de la vaina aislante. Esas porciones desnudas se denominaron nódulos de Ranvier, en honor de Louis-Antoine Ranvier, que los descubrió.

Se sabe que los impulsos nerviosos recorren los axones cien veces más deprisa cuando se hallan cubiertos de mielina y que la mielina envuelve un axón como si se tratara de una cinta aislante, con hasta 150 capas concén-

blanca?

La sustancia blanca del cerebro se consideraba soporte pasivo de la actividad neuronal. La investigación reciente demuestra que interviene en el aprendizaje y en la enfermedad mental



1. LA ESCULTURA corresponde a una vista superior de la cabeza: se muestran la corteza cerebral (*cobre*) y la sustancia blanca (*centro*).

ESCULTURA DE MARGIE MCDONALD, FOTOGRAFIADA POR FRANK ROSS

tricas entre nódulos. La sustancia se fabrica en láminas. De ello se encargan dos tipos de células gliales.

La neuroglía corresponde a un conjunto de células que, si bien no son neuronas, abundan en el cerebro y el sistema nervioso [*véase* "Células de la glía", por R. Douglas Fields; Investigación y Ciencia, junio de 2004]. Los oligodendrocitos, unas células gliales con forma de pulpo, construyen la envoltura.

Las señales eléctricas, que no pueden escaparse a través de la vaina de mielina, circulan velozmente por el axón de un nódulo a otro. En los nervios fuera del cerebro y de la médula espinal, unas células gliales alargadas, las células de Schwann, sintetizan la mielina.

Sin la mielina, la señal se escapa y se disipa. Para conseguir una velocidad de conducción máxima, el grosor del aislante debe guardar una proporción determinada con el diámetro de la fibra que envuelve. La relación óptima entre el diámetro del axón desnudo y el diámetro total de la fibra (incluida la mielina) es de 0,6. Se desconoce el modo en que "saben" los dendrocitos el número de capas de aislante necesarias para crear el grosor apropiado en axones de diferente diámetro. Pero en fecha reciente, Klaus-Armin Nave, del Instituto Max Planck de Medicina Experimental en Gotinga, descubrió que las células de Schwann detectan una proteína que reviste los axones: la neurregulina. Si se aumenta o inhibe la cantidad de esa proteína, la célula de Schwann produce mayor o menor número de capas de mielina alrededor del axón. Curiosamente, muchas personas que sufren trastorno bipolar o esquizofrenia poseen un defecto en el gen que regula la síntesis de esa proteína.

La mielinización se produce a edades distintas. En el recién nacido, la mielina predomina sólo en unas pocas regiones cerebrales; aumenta luego a un ritmo irregular. En ciertos lugares la deposición del aislante no termina hasta los 25 o 30 años. Cuando el individuo alcanza la edad adulta, la mielinización progresa como una onda, desde la parte posterior de la corteza cerebral (nuca) hasta la parte frontal (frente). Termina en los lóbulos frontales, las regiones responsables de la planificación, el juicio y el razonamiento de nivel superior, capacidades que se adquieren sólo con la experiencia. Se ha conjeturado que la escasez de mielina en el prosencéfalo explica que los adolescentes no posean la capacidad de los adultos para tomar decisiones. Ante tales observaciones, se presume la importancia crítica de la mielina para la inteligencia.

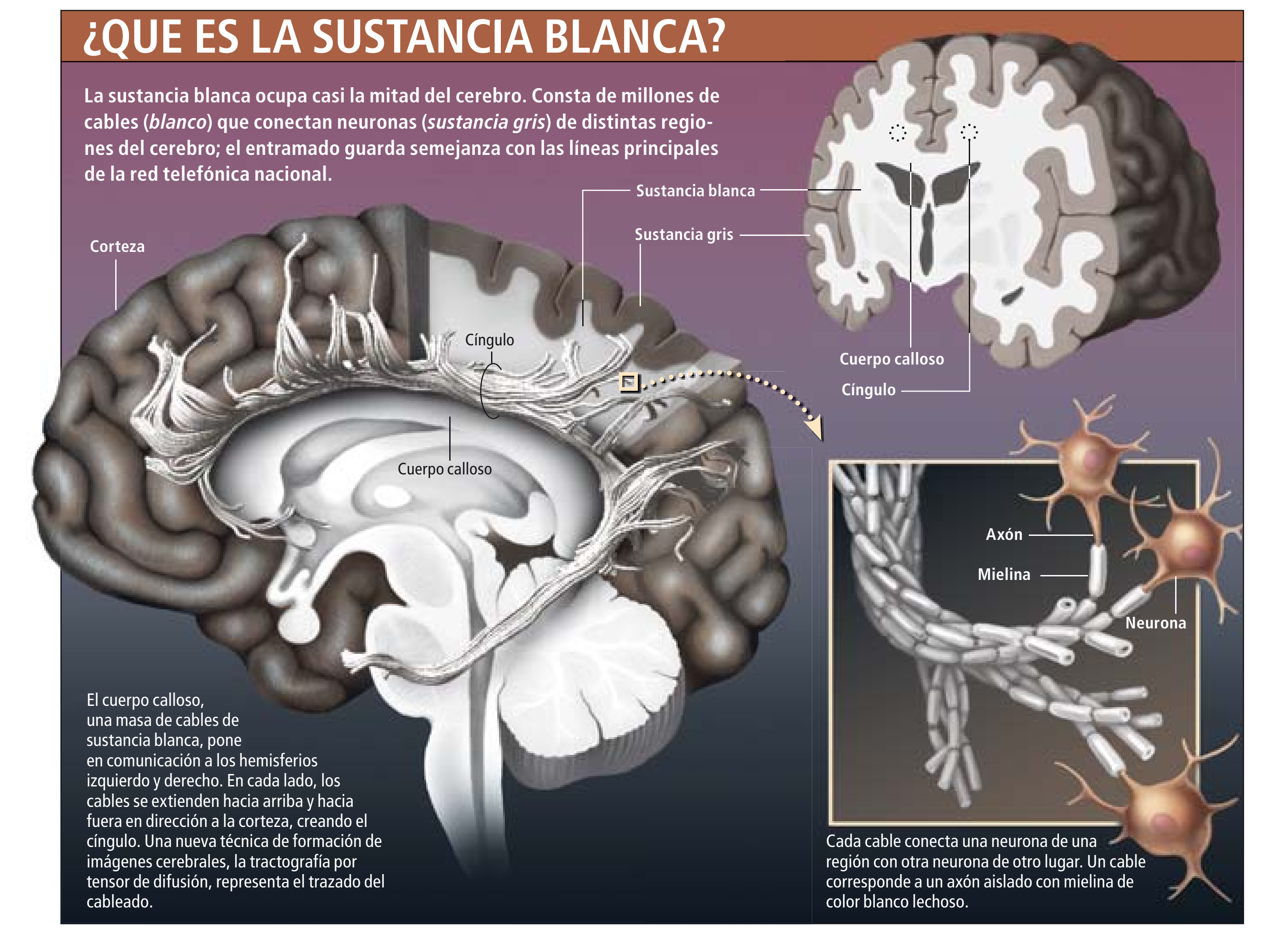
Se admite también que el proceso de revestimiento de los axones no termina hasta el principio de la edad adulta, pues en ese período inicial los axones continúan creciendo, se ramifican y orientan en función de la experiencia del individuo. Una vez los axones se hallan mielinizados, los cambios que experimentan son más limitados. Durante años, persistió el debate en torno a determinadas

El autor

R. Douglas Fields dirige la sección de desarrollo y plasticidad del sistema nervioso en el estadounidense Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano. Ha escrito varios artículos para *Mente y cerebro* y para *Investigación y Ciencia*.

¿QUE ES LA SUSTANCIA BLANCA?

La sustancia blanca ocupa casi la mitad del cerebro. Consta de millones de cables (*blanco*) que conectan neuronas (*sustancia gris*) de distintas regiones del cerebro; el entramado guarda semejanza con las líneas principales de la red telefónica nacional.



El cuerpo calloso, una masa de cables de sustancia blanca, pone en comunicación a los hemisferios izquierdo y derecho. En cada lado, los cables se extienden hacia arriba y hacia fuera en dirección a la corteza, creando el cíngulo. Una nueva técnica de formación de imágenes cerebrales, la tractografía por tensor de difusión, representa el trazado del cableado.

Cada cable conecta una neurona de una región con otra neurona de otro lugar. Un cable corresponde a un axón aislado con mielina de color blanco lechoso.

JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*); DEREK JONES *Universidad de Cardiff (tractografía del cíngulo)*

cuestiones abiertas: ¿está programada la mielinización o son nuestras experiencias vitales las que determinan el número de capas y, en consecuencia, influyen en nuestro aprendizaje? ¿Aumenta con la mielina nuestra capacidad cognitiva? ¿Se encuentra acaso restringida la cognición en las regiones donde la mielina no se ha acumulado todavía?

Fredrick Ullén, pianista virtuoso y profesor en el Instituto del Cerebro de Estocolmo, se empeñó en despejar los interrogantes. En el año 2005, con sus colaboradores aplicó una nueva técnica de formación de imágenes cerebrales, la tractografía por tensor de difusión, para examinar el encéfalo de pianistas profesionales. Esa técnica utiliza el mismo aparato de resonancia magnética nuclear que opera en los hospitales, pero se basa en la aplicación de distintos algoritmos y tipo de campo magnético.

Se crean imágenes de múltiples secciones del cerebro que, en conjunto, generan una imagen tridimensional. Las secciones representan los vectores que definen el movimiento del agua en el tejido; los vectores se definen matemáticamente en forma de tensores (matrices 3×3 de vectores). En la sustancia gris las señales del tensor de difusión son débiles porque el agua se orienta de forma simétrica. Pero a lo largo de los cordones de axones el agua se orienta de forma asimétrica; este patrón irregular ilumina la sustancia blanca y expone las vías principales de transferencia de información entre las regiones cerebrales. Cuanto mayor sea la cobertura de mielina y la unión entre fibras, mayor será la intensidad de la señal del tensor de difusión.

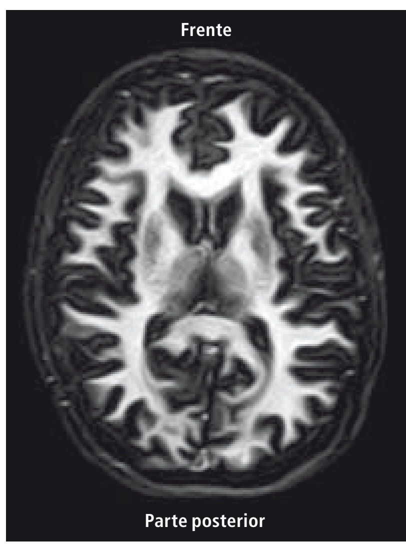
Ullén descubrió que, en los pianistas profesionales, ciertas regiones de sustancia blanca se hallaban más desarrolladas que en las personas legas. Las regiones implicadas ponían en conexión partes de la corteza cerebral fundamentales para la digitación con zonas que dirigen otros procesos cognitivos que operan cuando se interpreta música.

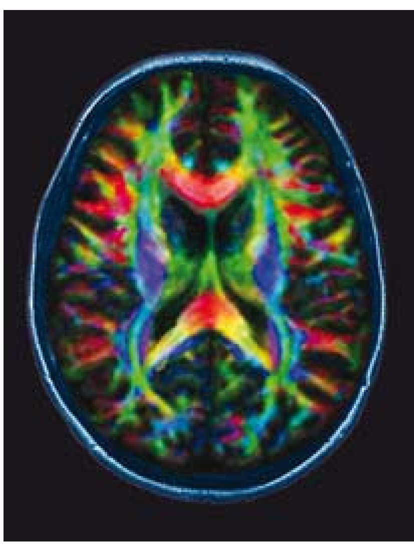
También halló que cuantas más horas al día había ensayado un músico a lo largo del tiempo, más intensas eran las señales del tensor de difusión en esos cordones de materia blanca; asimismo, los axones presentaban mayor número de capas de mielina o una unión más estrecha. Quizá los axones sencillamente se habían extendido, con lo que habrían requerido mayor cobertura de mielina para mantener el cociente óptimo de 0,6. Mientras no se realice una autopsia, la pregunta permanecerá abierta. Con todo, el descubrimiento reviste importancia, pues demuestra que el aprendizaje de una habilidad compleja produce cambios notables en la sustancia blanca, una estructura cerebral que no contiene somas neuronales ni sinapsis, sólo axones y neuroglía.

La investigación sobre animales, cuyo cerebro sí se examina físicamente, revela que la cobertura mielínica cambia en función de la experiencia mental y el entorno del animal durante el crecimiento. En 2005, William T. Greenough, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, demostró que las ratas que crecían en un entorno de estimulación (con acceso a múltiples juguetes e interacción social) presentaban fibras más mielinizadas en el cuerpo calloso, un haz apretado de axones que pone en conexión los dos hemisferios cerebrales.

Los resultados parecen concordar con los estudios que ha llevado a cabo Vincent J. Schmithorst, del Hospital Infantil de Cincinnati, mediante la técnica del tensor de difusión. Se comparó la sustancia blanca de niños de edades comprendidas entre 5 y 18 años. Se halló una correlación directa entre el desarrollo de la estructura de la sustancia blanca y el cociente intelectual. Otras investigaciones ponen de manifiesto que los niños desatendidos poseen hasta un 17 por ciento menos de sustancia blanca en el cuerpo calloso.







2. LA RESONANCIA MAGNETICA al uso (*arriba*) ofrece una representación aproximada de la sustancia blanca (*zonas gris oscuro, abajo a la izquierda*). Una nueva técnica de resonancia magnética, la tractografía por tensor de difusión, pone de relieve la estructura con mayor detalle (*abajo, derecha*): el color rojo y el amarillo indican una mayor organización de la sustancia blanca.

PHILIPS HEALTHCARE (*aparato*); ZEPHYR/PHOTO RESEARCHERS, INC. (*imagen en color*); JOE GALLIVAN *Ulster Medical and Surgical Specialists* (*imagen en blanco y negro*)

ENFERMEDADES CONOCIDAS

Se sabe que la deficiencia o ausencia de mielina en el sistema nervioso central causa diversas enfermedades degenerativas, entre ellas:

ESCLEROSIS MULTIPLE
(degeneración del sistema nervioso central)

PARALISIS CEREBRAL
(disfunción grave del control muscular)

ENFERMEDAD DE ALEXANDER
(destrucción del sistema nervioso central)

Función cerebral

Esos hallazgos indican que la experiencia influye en la mielinización y que la mielina acumulada refuerza el aprendizaje y mejora las destrezas. Admitido eso, hemos de dar con una explicación verosímil sobre el modo en que la abundancia de mielina estimula las funciones intelectuales, así como una prueba directa de que su defecto altera las capacidades mentales.

En nuestro laboratorio hemos descrito varios mecanismos mediante los cuales la experiencia influye en la mielinización. En el cerebro, las neuronas descargan impulsos a lo largo de los axones. Si se hacen crecer neuronas de feto de ratón en placas de cultivo provistas de electrodos de platino, se pueden imponer patrones de impulsos en las mismas. Mediante ese método, descubrimos que los impulsos provocados regulaban genes específicos en las neuronas. Uno de ellos correspondía a L1-CAM, una proteína "pegajosa" que resulta esencial para adherir la primera capa que ciñe al axón cuando la mielina empieza a acumularse.

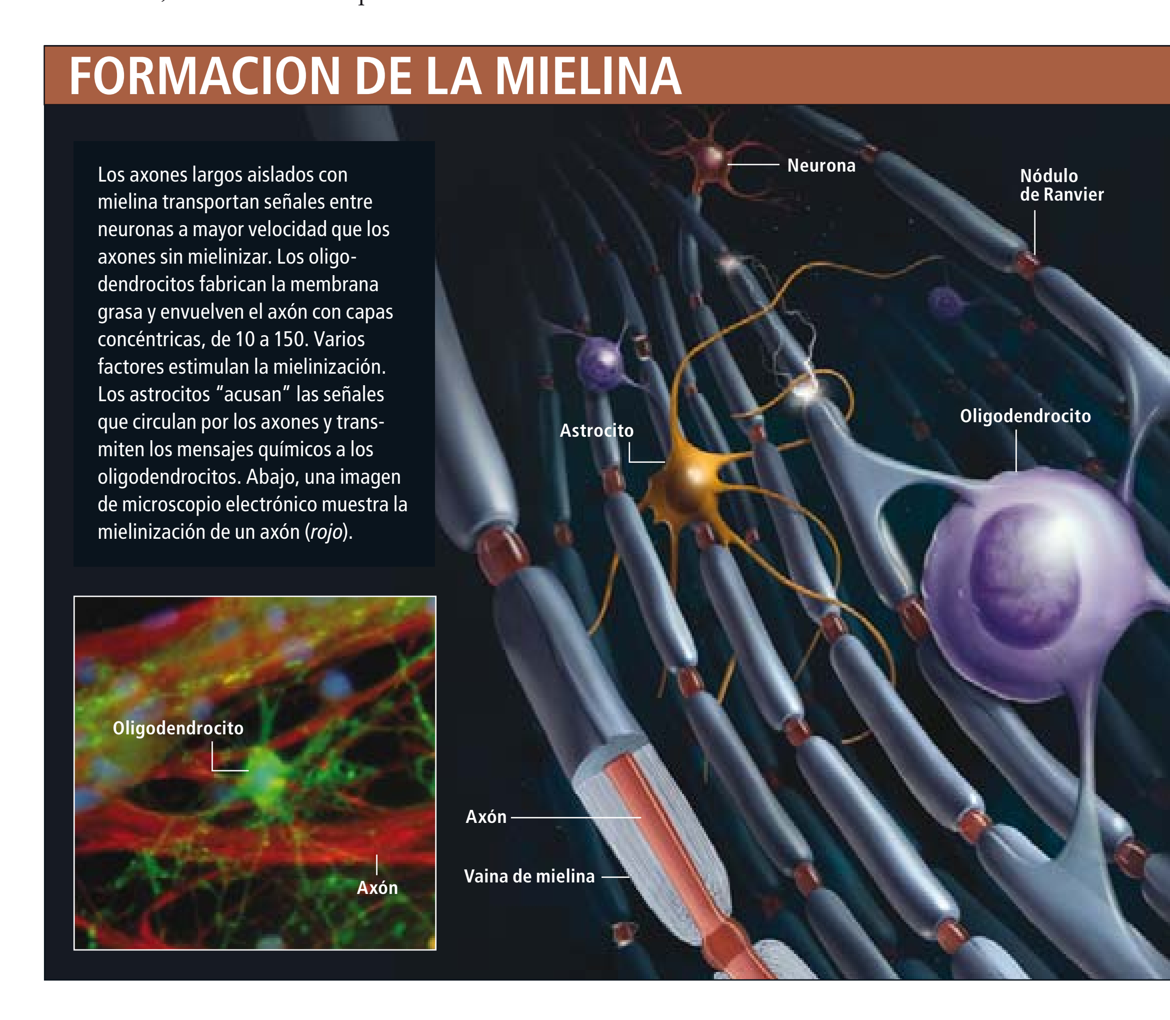
Observamos también que la neuroglía "acusa" los impulsos descargados a lo largo de los axones y que el tráfico detectado altera el grado de mielinización; un tipo de célula glial, el astrocito, libera un factor químico cuando nota un mayor flujo de impulsos. Ese código químico estimula en los oligodendrocitos la síntesis de mielina. Los niños que contraen la enfermedad de Alexander, un trastorno letal que provoca retraso mental y alteración de la mielina, poseen una mutación en un gen del astrocito.

Para mejor expresar la relación de la sustancia blanca con la capacidad cognitiva podemos valernos de una analogía. A la manera de Internet, diríase que la información del cerebro debería transmitirse lo más rápido posible. Para ello, todos los axones tendrían que hallarse mielinizados por igual. Ahora bien, en neurología, más veloz no significa necesariamente mejor. La información debe recorrer distancias enormes entre los centros cerebrales. Cada centro desempeña una función determinada y envía sus datos a otra región para que realice la etapa siguiente del análisis.

En el aprendizaje de una actividad compleja (tocar el piano, por ejemplo), los mensajes van y vienen entre numerosas regiones; una información que fluye a través de distintas distancias ha de llegar de forma simultánea a un lugar y en un instante precisos. Para conseguir tal coordinación son necesarios los retrasos. Si todos los axones transmitieran in-

VARISHA SHUKLA (*micrografía*); ALAN HOOFRING *NIH Medical Arts* (*ilustración*)

FORMACION DE LA MIELINA



Los axones largos aislados con mielina transportan señales entre neuronas a mayor velocidad que los axones sin mielinizar. Los oligodendrocitos fabrican la membrana grasa y envuelven el axón con capas concéntricas, de 10 a 150. Varios factores estimulan la mielinización. Los astrocitos "acusan" las señales que circulan por los axones y transmiten los mensajes químicos a los oligodendrocitos. Abajo, una imagen de microscopio electrónico muestra la mielinización de un axón (*rojo*).

formación a la máxima velocidad, las señales de las neuronas remotas llegarían siempre más tarde que las señales de las neuronas vecinas. Un impulso suele tardar unos 30 milisegundos en trasladarse de un hemisferio cerebral al otro mediante los axones mielinizados del cuerpo calloso; a través de axones sin vaina de mielina tardan entre 150 y 300 milisegundos. En el momento de nacer, ninguno de los axones del cuerpo calloso se halla mielinizado; en la edad adulta, el 30 por ciento permanecen descubiertos. Esa disparidad permite coordinar las velocidades de transmisión.

Quizá los nódulos de Ranvier resulten también cruciales para la coordinación. En los últimos años, los expertos han llegado a la conclusión de que los nódulos, lejos de ser un defecto, operan como intrincados repetidores bioeléctricos que generan, regulan y propagan con prontitud, a lo largo del axón, las señales eléctricas. Al estudiar el excelente oído de las lechuzas, Catherine Carr, de la Universidad de Maryland, y Masakazu Konishi, del Instituto de Tecnología de California, han puesto de manifiesto que durante la mielinización los oligodendrocitos insertan, a lo largo de ciertos axones, un número de nódulos mayor de lo que sería óptimo para una transmisión rápida del impulso. ¿Con qué fin? Retrasar las señales que circulan por su interior.

No cabe, pues, duda alguna de que la velocidad de transmisión del impulso eléctrico constituye un aspecto vital de la función cerebral. La memoria y el aprendizaje se producen cuando determinados circuitos neuronales refuerzan su conexión. Parece que la mielina influye sobre esa interacción mediante el ajuste de la velocidad de conducción para que las descargas de los impulsos eléctricos de múltiples axones lleguen al mismo tiempo.

Cuando se produce esa convergencia, los voltajes individuales se suman y aumenta la intensidad de la señal, lo que estrecha la conexión entre las neuronas implicadas. No conocemos todavía los mecanismos que subyacen bajo su función cerebral, pero resulta manifiesto que la mielina responde al entorno e interviene en la capacidad de aprendizaje.

ALAN HOOFRING *NIH Medical Arts* Y JEN CHRISTIANSEN (*inserto*)

El nódulo de Ranvier opera a modo de repetidor: transmite con prontitud los impulsos a lo largo de un axón. El impulso se concentra y se descarga de un nódulo al siguiente como una punta de tensión, que se inicia cuando los canales del nódulo se abren, inundándolo con iones de sodio. Los numerosos canales de potasio que se concentran en el yuxtaparanódulo se abren luego para lanzar el impulso a lo largo del axón hasta el nódulo siguiente.

Nódulo de Ranvier
Canal
Paranódulo (*violeta*)
Ion sodio
Yuxtaparanódulo (*azul*)
Canales de potasio
Axón
Vaina de mielina
Impulso de la señal

Aprendizaje y salud mental

En ese escenario, no resulta difícil imaginar que una transmisión defectuosa provocaría trastornos mentales. Tras decenios de atribuir a la sustancia gris la responsabilidad de las discapacidades mentales, disponemos ahora de pruebas que apuntan a la sustancia blanca. La dislexia, por ejemplo, se debe a la pérdida de sincronización de la información circulante por los circuitos que operan en la lectura; las imágenes cerebrales han revelado una reducción de la sustancia blanca en las vías implicadas, causante posible de tal disfunción. Se cree que las alteraciones de la sustancia blanca reflejan los defectos de la mielinización, así como las anomalías del desarrollo neuronal que afectan a esas conexiones de sustancia blanca.

La amusia está ocasionada por deficiencias en el procesamiento de alto nivel en la corteza cerebral, lugar donde se analizan los sonidos. Kristi L. Hyde, de la Universidad de McGill, ha demostrado que los individuos que sufren ese trastorno poseen una mielinización menguada en cierto haz de fibras del prosencéfalo derecho.

Las investigaciones recientes de Leslie K. Jacobsen, de la Universidad de Yale, indican que la exposición al humo del tabaco durante el desarrollo fetal tardío o durante la adolescencia, cuando el haz aludido se halla acumulando mielina, causa el deterioro de la sustancia blanca. La estructura de la misma, según se observa mediante la técnica del tensor de difusión, muestra una correlación directa con los resultados de las pruebas de audiometría. La nicotina afecta a los receptores de los oligodendrocitos que regulan la formación de las células. La exposición a determinados factores ambientales durante los períodos cru-

POSIBLES ENFERMEDADES

Se sospecha que la formación anómala de la mielina contribuye a ciertas enfermedades mentales, entre ellas:

ESQUIZOFRENIA
(delirios, alucinaciones, personalidad múltiple)

AUTISMO
(comunicación deficiente e indiferencia emocional)

TRASTORNO BIPOLAR
(períodos de manía alternados con períodos de depresión)

DISLEXIA
(errores de ortografía y lectura o trastorno general del lenguaje)

ciales de mielinización tiene consecuencias de por vida.

Existen numerosas pruebas de que la esquizofrenia corresponde a un trastorno del desarrollo relacionado con una conectividad deficiente. Los médicos siempre se han preguntado por qué esa enfermedad aparece típicamente durante la adolescencia. Acontece que, en ese período, alcanza su máximo la mielinización del prosencéfalo. Aquí las neuronas se han establecido hace tiempo, pero la mielina cambia, lo que despierta sospechas sobre su influencia.

Además, alrededor de una veintena de estudios realizados en los últimos años concluyen que la sustancia blanca se halla alterada (posee menos oligodendrocitos de lo normal) en varias regiones del cerebro esquizofrénico. Y cuando empezaron a aplicarse los microchips de ADN (técnica diagnóstica basada en el análisis simultáneo de miles de genes), los investigadores se sorprendieron al descubrir que un gran número de los genes mutados y ligados a la esquizofrenia participaban en la mielinización.

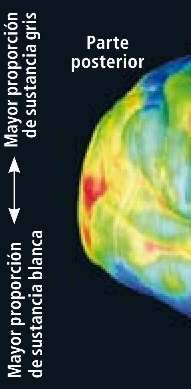
Se han detectado también anomalías en la sustancia blanca de las personas afectadas por el trastorno de déficit de atención con hiperactividad, trastorno bipolar, trastornos del lenguaje, deterioro cognitivo asociado a la edad, enfermedad de Alzheimer y mitomanía.

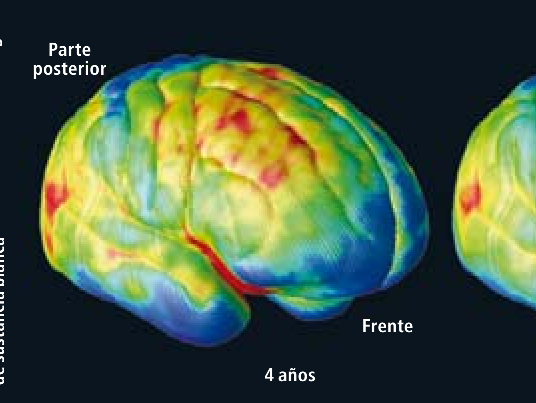
Por supuesto, el desarrollo insuficiente o debilitamiento de la mielina podría ser resultado de la señalización deficiente entre neuronas, no su causa. Después de todo, la función cognitiva depende de la comunicación neuronal a través de las sinapsis en la sustancia gris de la corteza, donde operan la mayoría de las sustancias psicoactivas. Pero la comunicación óptima entre las regiones cerebrales, esencial para un buen funcionamiento intelectual, se asienta sobre la sustancia blanca que las conecta. En 2007, Gabriel Corfas, del Hospital Infantil de Boston, demostró que la destrucción de los genes de los oligodendrocitos (no de las neuronas) de ratones acarreaba alteraciones notables en la conducta, semejantes a la esquizofrenia. Y los efectos en el comportamiento guardan relación con uno de los mismos genes, el de la neurregulina, que aparece alterado en la biopsia de cerebros esquizofrénicos.

La pregunta del huevo o la gallina sobre si los cambios mielínicos alteran las neuronas o si son los cambios en la estructura neuronal los que alteran la mielina se resolverá de la forma acostumbrada en ese tipo de dilemas: mediante el reconocimiento de que existe una estrecha interdependencia entre ambos fenómenos. La mielinización de las células gliales responde a modificaciones en el diámetro del axón, pero las propias células regulan también dicho diámetro y determinan si un axón sobrevivirá o no. Por botón de muestra, en la esclerosis múltiple, los axones y las neuronas mueren tras la desmielinización desencadenada por la enfermedad.

DESARROLLO DEL CEREBRO

Cuando nacemos, el número de axones recubiertos de mielina es bajo. En su mayoría, la adquieren con el tiempo, desde la parte posterior de la corteza cerebral hacia la parte delantera. En la secuencia que aquí se muestra, realizada por Paul Thompson, de la Universidad de California en Los Angeles, se ilustra la reducción de las neuronas y el aumento de la mielina. Las áreas dedicadas a funciones básicas, como la visión (*parte posterior*), se completan antes de los cuatro años de edad; le siguen las áreas del lenguaje y, por fin, del autocontrol (*frente*).



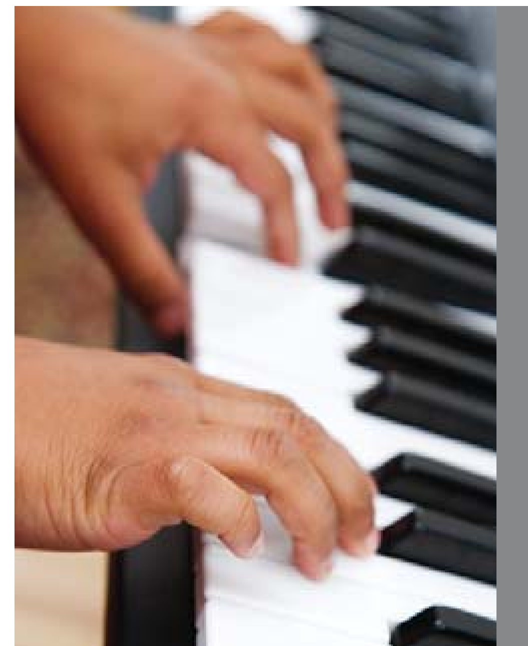


Reestructuración en edad avanzada

A medida que va madurando nuestro cerebro, de la infancia a la edad adulta, mejora la precisión de las conexiones entre las regiones. La calidad de las conexiones podría determinar la calidad del aprendizaje de ciertas habilidades a determinad edad.

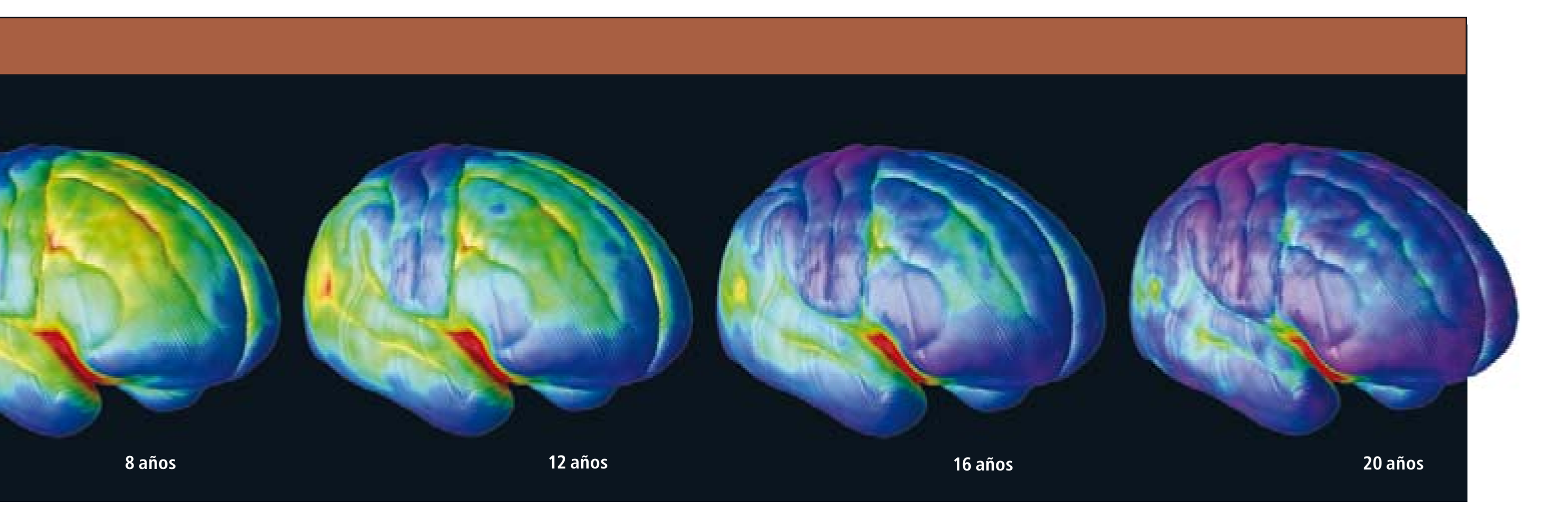
Los estudios de Ullén sobre pianistas expertos revelaron que la sustancia blanca estaba más desarrollada en el cerebro de los individuos que habían empezado a tocar el instrumento a una edad más temprana. En las personas que aprendieron después de la adolescencia, la formación de sustancia blanca había aumentado sólo en el prosencéfalo, la región que todavía experimentaba mielinización.

De ese fenómeno cabe inferir que el aislamiento de las fibras nerviosas determina, en cierta medida, "ventanas" de edad para el aprendizaje de nuevas destrezas: intervalos de



3. LOS PIANISTAS PROFESIONALES presentan en ciertas regiones mayor mielinización que las personas legas, lo que da pie a suponer la influencia de esa vaina en el aprendizaje. Además, la sustancia blanca es más extensa en los pianistas que empiezan a practicar antes de los once años que en los que inician su formación durante la adolescencia o más tarde. Cabe, pues, conjeturar que existen períodos críticos para la adquisición de destrezas superiores.

INTI ST. CLAIR *Getty Images*



PAUL THOMPSON U.C.L.A. (imágenes de la sustancia gris)

oportunidad o períodos críticos durante los cuales se adquieren, o se aprenden con mayor facilidad, ciertas habilidades. Si estudiamos un idioma después de la pubertad, tenderemos a hablarlo con el acento de nuestra lengua materna; si lo aprendemos durante la infancia, lo hablaremos como un nativo. Se debe esa disparidad a los circuitos cerebrales que detectan el habla, que se reestructuran según los sonidos que escuchamos sólo de niños.

Con el tiempo, perdemos las conexiones que nos permitirían distinguir los sonidos peculiares de un idioma extranjero. En términos evolutivos, después de los primeros años de vida, el cerebro carece de motivos para mantener las conexiones que sirven para detectar sonidos que nunca ha oído. Esos períodos críticos explican también que los niños se recuperen mejor que los adultos de una lesión cerebral.

En la mielina se han identificado proteínas específicas que evitan que los axones se ramifiquen y establezcan nuevas conexiones. Martin E. Schwab, de la Universidad de Zúrich, describió la primera entre las diversas proteínas de mielina que provocan que las nuevas ramificaciones de los axones se atrofien de forma instantánea con el contacto. Se trataba de la proteína Nogo (hoy, Nogo-A). Si se la neutraliza, los animales con una lesión en la médula espinal reparan las conexiones dañadas y recuperan la sensibilidad y el movimiento. En fecha reciente, Stephen M. Strittmatter, de la Universidad de Yale, descubrió que el período crítico para establecer, vía experiencia, conexiones cerebrales se reiniciaba con la inhibición de las señales de Nogo. En ratones viejos, la destrucción de la proteína provocaba la reestructuración de las conexiones para la visión.

Si el proceso de mielinización puede darse por concluido a los 20 años de edad de la persona, ¿mantiene el cerebro su plasticidad a lo largo de la edad mediana y avanzada? Los estudios demuestran que el ejercicio mental en una persona de 60, 70 y 80 años retrasa la aparición de la enfermedad de Alzheimer. Y ¿cómo aumenta la sabiduría de una persona a lo largo de su vida? Son preguntas sin respuesta todavía. Nadie ha abordado las modificaciones de la mielina en animales viejos. Otros experimentos indican que la mielinización continúa hasta los 50 años, pero a un ritmo más lento.

Sin duda, la sustancia blanca desempeña una función fundamental en los tipos de aprendizaje que exigen un ejercicio prolongado y repetición, así como la integración generalizada entre regiones distantes de la corteza cerebral. A los niños cuyo cerebro todavía se halla en fase de mielinización les resulta más fácil adquirir nuevas habilidades que a sus abuelos. Para diversas capacidades intelectuales y atléticas, si un individuo desea alcanzar un nivel elevado debe empezar a ejercitarlas a una edad temprana. El cerebro que poseemos hoy lo construimos al interaccionar con el entorno cuando estábamos creciendo y nuestras conexiones neuronales estaban todavía mielinizándose. Por mucho que cultivemos una destreza, nunca podremos convertirnos en un pianista, jugador de ajedrez o tenista de fama internacional, a menos que hayamos empezado de niños.

Las personas mayores pueden seguir aprendiendo. Por supuesto. Pero a través de un tipo distinto de aprendizaje, basado en la intervención directa de las sinapsis. Dado que el entrenamiento intensivo favorece la excitación de las neuronas, existe la posibilidad de que esta descarga neuronal estimule la mielinización.

Quizás algún día, cuando sepamos cuándo y por qué se forma la sustancia blanca, se desarrollarán tratamientos para modificarla, incluso cuando envejece. Para ello, necesitamos identificar la señal que ordena a un oligodendrocito la mielinización de un axón y no de otro vecino. Esa información clave, oculta en las profundidades de la sustancia gris, espera salir a la luz con las futuras investigaciones.

Bibliografía complementaria

MYELINATION: AN OVERLOOKED MECHANISM OF SYNAPTIC PLASTICITY? R. Douglas Fields en *Neuroscientist*, vol. 11, n.º 5, págs. 528-531; 2005.

EXTENSIVE PIANO PRACTICING HAS REGIONALLY SPECIFIC EFFECTS ON WHITE MATTER DEVELOPMENT. Sara L. Bengtsson et al. en *Nature Neuroscience*, vol. 8, n.º 9, págs. 1148-1150; septiembre 2005.

ASTROCYTES PROMOTE MYELINATION IN RESPONSE TO ELECTRICAL IMPULSES. T. Ishibashi et al. en *Neuron*, vol. 49, págs. 823-832; 2006.

HOW TO GROW A SUPER ATHLETE. D. Coyle en *Play Magazine* (*New York Times Sports*), 4 de marzo, 2007.

LOS LIMITES DE LA Computac

Scott Aaronson

Las computadoras cuánticas podrían ser velocísimas en tareas muy concretas. En la mayoría de los problemas apenas descollarían sobre los ordenadores de hoy



Un error frecuente —recuérdese, por ejemplo, *The Economist* de 15 de febrero de 2007— consiste en afirmar que, en teoría, las computadoras cuánticas podrían resolver rápidamente una colección de problemas de singular dificultad, los llamados problemas NP-completos, algo que hasta el momento no se puede hacer ni aun con los ordenadores más potentes. Se presumía que las computadoras cuánticas podrían lograr tal hazaña porque permitirían el procesamiento simultáneo de todas las posibles soluciones.

Si en verdad fuese posible construir semejante computadora mágica, capaz de resolver un problema NP-completo en un abrir y cerrar de ojos, el mundo se convertiría en un lugar muy diferente. Podríamos, por ejemplo, ordenarle a nuestra mágica computadora que buscase posibles regularidades en las fluctuaciones de los mercados de valores, en las series de datos meteorológicos o en la actividad cerebral. A diferencia de los ordenadores actuales, cuya programación exige una perfecta comprensión de los problemas, la elucidación de tales regularidades sería enteramente rutinaria; no exigiría un conocimiento detallado de la sustancia del problema.

La computadora mágica podría, asimismo, automatizar la creatividad matemática. Podríamos pedirle a nuestra computadora que examinase todas las posibles demostraciones o refutaciones de un problema sin resolver que contuvieran hasta, sea por caso, mil millones de símbolos. (Si una demostración se extendiese más, ¿quién iba a leerla?)

Si las computadoras cuánticas prometieran estas fuerzas matemáticas cuasidivinas, su aparición sería, a buen seguro, coetánea de los viajes por el hiperespacio y los escudos antigravitatorios. Pero si bien es cierto que no debemos aceptar las habituales hipérboles, a mi entender no es menos erróneo desdeñar la computación cuántica como pura ciencia ficción. Lo que se ha de hacer es averiguar dónde se encuentran sus límites.

En los 26 años que han transcurrido desde que Richard Feynman propuso la idea de computación cuántica, las ciencias del cómputo han realizado enormes progresos en la averiguación de los tipos de problemas donde la computación cuántica sería eficaz. De acuerdo con nuestros conocimientos actuales, sí *proporcionarían* aceleraciones impresionantes en unos cuantos problemas concretos: por ejemplo, para descifrar los códigos criptográficos hoy ampliamente utilizados en las transacciones monetarias por Internet. En el caso de otros problemas, sin embargo, como los de jugar al ajedrez, las reservas de plaza en las líneas aéreas o la demostración automática de teore-

ILUSTRACIONES DE DUŠAN PETRIČIĆ

ión cuántica

mas, las computadoras cuánticas sufrirían de muchas de las limitaciones algorítmicas que hoy padecen los ordenadores clásicos.

Estas limitaciones son completamente independientes de las dificultades prácticas que entraña la construcción de computadoras cuánticas, como la decoherencia (interacción indeseada entre la computadora cuántica y su entorno, que introduce errores). En particular, las limitaciones matemáticas de lo programable en un ordenador persistirían aunque se pudiera construir una computadora cuántica que no sufriese en absoluto los efectos de la decoherencia.

Difícil, más difícil todavía, dificilísimo

¿Cómo es posible que una hipotética computadora cuántica pueda proporcionar grandes aceleraciones en determinados problemas, así el descifrado de códigos, y no pueda hacerlo, en cambio, en otros? ¿Acaso un ordenador rápido no es siempre rápido? Pues no, y la explicación nos lleva directamente al meollo intelectual de la ciencia de la computación. En esta ciencia, lo más importante de un problema es la rapidez con que aumenta el tiempo requerido para resolverlo conforme crece su tamaño. El tiempo se mide por el número de pasos elementales necesarios para que el algoritmo llegue a una solución.

Si efectuamos una multiplicación por el método que aprendimos en la escuela elemental, el cálculo del producto de dos números de n cifras requiere una cantidad de tiempo que crece con n^2, el cuadrado del número de dígitos (el tiempo empleado es un "polinomio en n). Pero la descomposición de un número en sus factores primos, utilizando incluso los métodos más avanzados conocidos, exige un tiempo que aumenta en función exponencial del número de dígitos (más en concreto, como 2 elevado a la raíz cúbica del número n). La descomposición en factores constituye un problema intrínsecamente más difícil que la multiplicación, y cuando se llega a millares de dígitos, tal diferencia adquiere una importancia mucho mayor que la diferencia entre un Commodore 64 y un superordenador.

El tipo de problemas que los ordenadores pueden resolver en tiempos de duración razonable, incluso para valores grandes de n, son aquellos para los que existe un algoritmo que requiere un número de pasos que crece como una potencia de n con exponente fijo, como n, o n^2 o $n^{2,5}$. De tales algoritmos se dice que son "eficientes". Los problemas resolubles mediante algoritmos eficientes se dice que pertenecen a la clase de complejidad P, abreviatura de "tiempo polinómico".

He aquí un ejemplo sencillo de problema de clase P: Dado un mapa de carreteras, ¿es alcanzable cada ciudad desde otra ciudad cualquiera? P contiene asimismo problemas cuyas soluciones eficientes no son tan obvias. Sea por caso: Dado un número entero, ¿es primo (como el 13) o es compuesto (como el 12)? Dada una lista de hombres y mujeres que desean casarse unos con otros, ¿será posible asociar a cada persona con una que quiere casarse con ella?

Supongamos, en cambio, que se nos proporcionan las dimensiones de una serie de cajas y que deseamos encajarlas en el maletero del coche. O que se nos entrega un mapa y deseamos colorear cada región de rojo, de azul o de verde, de modo que no haya dos regiones fronterizas del mismo color. O que se dispone de una lista de islas conectadas por puentes y deseamos un recorrido de ida y vuelta que visite cada isla exactamente una vez. Aunque se conocen para estos problemas algoritmos que son algo mejores que el puro tanteo de todas las posibles soluciones, no se conoce ninguno que sea fundamentalmente mejor. Todos los algoritmos conocidos necesitarán de tiempos de ejecución que crecerán exponencialmente con el tamaño del problema.

Resulta que los tres problemas que acabo de mencionar comparten una propiedad muy interesante: en el fondo, todos son "el mismo

CONCEPTOS BASICOS

- Las computadoras cuánticas se valdrían de las extrañas reglas de la mecánica cuántica para procesar información de maneras que resultarían imposibles en un ordenador común.
- Podrían resolver ciertos problemas, como la factorización de números enteros, a velocidades vertiginosas en comparación con lo que puede hacerse, en el mejor de los casos, con ordenadores clásicos. Pero los análisis llevan a pensar que en la mayoría de los problemas las computadoras cuánticas sólo superarían ligeramente a las máquinas ordinarias.
- Raras alteraciones de las leyes físicas podrían consentir la construcción de computadoras que resolviesen amplias categorías de problemas difíciles. Pero alteraciones así no parecen verosímiles. La imposibilidad de resolver estos problemas en el mundo real tal vez debería ser considerada un principio fundamental de la física.

Computación cuántica:

Los físicos están persiguiendo con tenacidad la construcción de computadoras cuánticas, que sacarían provecho de la mecánica cuántica y sus peculiaridades para lograr una eficiencia mayor que la conseguida por los ordenadores en uso.

1 La característica fundamental de una computadora cuántica es que no utiliza bits, sino qubits. Un qubit puede quedar plasmado en una partícula, un electrón por ejemplo, con "espín hacia arriba" (*en azul*) que representa un 1 o "espín hacia abajo" (*en rojo*) que representa un 0, y estados cuánticos —"superposiciones"— que comportan simultáneamente un espín arriba y un espín abajo (*en amarillo*).

2 Un pequeño número de partículas en estados de superposición puede incluir una cantidad de información enorme: un mero conjunto de 1000 partículas puede encontrarse en una superposición que represente todos los números desde 1 hasta 2^{1000} (aproximadamente, 10^{300}). Una computadora cuántica podría manejar en paralelo todos esos números, haciendo incidir impulsos de láser sobre las partículas.

3 Sin embargo, una vez concluido el cómputo, al medir los estados de las partículas, todas las versiones de los 10^{300} estados paralelos desaparecen, excepto una, que resulta seleccionada al azar. No obstante, una manipulación inteligente de las partículas permitiría resolver muy rápidamente la descomposición factorial de números grandes y problemas similares.

problema", en el sentido de que, de existir un algoritmo eficiente para uno cualquiera de ellos, se dispondría de algoritmos eficientes para los demás. Stephen A. Cook, de la Universidad de Toronto, Richard Karp, de la Universidad de California en Berkeley, y Leonid Levin, ahora en la de Boston, llegaron a esta notable conclusión hace más de 30 años, fechas en las que desarrollaron la teoría de NP-completitud.

NP es abreviatura de "tiempo polinómico no determinista". No se preocupe por el significado de esa expresión. En esencia, el conjunto NP está constituido por la clase de problemas para los cuales, una vez hallada una solución, se puede verificar en tiempo polinómico (algo así como n^2 o similar) que tal solución es correcta, a pesar incluso de que tal solución resulte difícil de hallar. Si se nos da un mapa que contiene miles de islas y puentes, es posible que se necesiten años para hallar un circuito que visite cada isla una sola vez; ahora bien, si nos es presentado un circuito concreto, no es difícil saber si ese circuito constituye una solución. Cuando un problema goza de esta propiedad, se dice que pertenece a NP. La clase NP abarca un enorme número de problemas de interés práctico. Cabe señalar que todos los problemas P son asimismo problemas NP; expresado de otro modo, la clase P está contenida en la clase NP. Pues si es posible resolver un problema rápidamente, la solución obtenida también podrá verificarse con presteza.

Los problemas NP-completos son, en esencia, los problemas de máxima dificultad de la clase NP. Constituyen los problemas que poseen la propiedad enunciada por Cook, Karp y Levin: de hallarse un algoritmo eficiente para uno cualquiera de ellos, podría ser adaptado para resolver los demás problemas NP.

El hallazgo de un algoritmo eficiente para un problema NP-completo entrañaría que la idea que en este momento tienen los científicos de la computación de las clases P, NP y NP-completa es totalmente errónea, pues tal hallazgo supondría que todos los problemas NP (incluidos los NP-completos) son en realidad problemas de clase P. Dicho con otras palabras, la clase P sería la misma que la clase NP, P = NP.

¿Existe realmente tal algoritmo? ¿Es P igual a NP? Tal es, literalmente, la pregunta del millón de dólares: el Instituto Clay de Matemáticas, en Cambridge, Massachusetts, ofrece un premio de un millón de dólares por su elucidación.

En el medio siglo transcurrido desde que se formuló el problema, no se ha descubierto un algoritmo eficiente para un problema NP-completo. En consecuencia, los expertos en computación de hoy están de acuerdo en que P no es igual que NP, P ≠ NP, aunque todavía nuestro saber no alcance para comprender por qué es así, o para demostrarlo y dar a esa aserción carácter de teorema.

Lo que la computación cuántica puede hacer

Si se concede que P ≠ NP, queda tan sólo una esperanza para resolver problemas NP-completos en tiempo polinómico, a saber, generalizar lo que entendemos por "computadora". Parece, a primera vista, que la mecánica cuántica podría suministrarnos precisamente el tipo de recursos necesarios. La mecánica cuántica hace posible el almacenamiento y manipulación de una vasta cantidad de información en los estados de un número no muy grande de partículas. Para comprender cómo se puede lograr tal cosa, imagine que tenemos 1000 partículas y que cada partícula, al ser medida, se nos presenta con espín hacia arriba o hacia abajo.

Para nuestros propósitos, es irrelevante lo que signifique que el espín de la partícula apunte en uno u otro sentido; lo único que importa es que la partícula posee una propiedad que, al ser medida, ofrece uno de dos valores.

Si hemos de describir el estado cuántico de esta colección de partículas, deberemos especificar un número para cada posible resultado de su medición. Tales números reciben el nombre de "amplitudes de probabilidad" de los resultados posibles y guardan una relación determinada con la probabilidad de cada uno. Mas, a diferencia de las probabilidades, las amplitudes cuánticas pueden tomar valores positivos o negativos (más aún, sus valores son números complejos). Por ejemplo, es necesaria una amplitud para describir la posibilidad de que el espín de todo el millar de partículas esté orientado hacia arriba, otra amplitud para la posibilidad de que el espín de las 500 primeras partículas apunte hacia arriba, y el de las otras 500, hacia abajo, y así sucesivamente. Existe un total de 2^{1000} posibles resultados, o sea, unos 10^{300} distintos valores; por eso, su expresión requiere números tan grandes: ¡mayores que el número de partículas del universo visible! La terminología técnica para esta situación es que las 1000 partículas se encuentran en una superposición de esos 10^{300} estados.

En otras palabras: podríamos almacenar simultáneamente 10^{300} números en nuestro colectivo de 1000 partículas. Seguidamente, efectuando ciertas operaciones sobre esas partículas y sobre otras auxiliares —mediante secuencias de impulsos de láser o de ondas de radio— podríamos ejecutar un algoritmo que transformase al mismo tiempo la totalidad de los 10^{300} números (cada uno de los cuales representa una posible solución). Si una vez efectuada esta operación nos fuera posible observar con precisión cada uno de los estados cuánticos finales de las partículas, tendríamos una genuina computadora mágica: se habrían comprobado 10^{300} posibles soluciones para un problema; y al final, podríamos discernir rápidamente cuál es la correcta.

Pero existe una dificultad. Según dictan las reglas de la mecánica cuántica, en la medición de las partículas (operación necesaria para observar su estado final) se seleccionará al azar una de las 10^{300} posibilidades, e inmediatamente todas las demás desaparecerán. El resultado no sería mejor que si utilizásemos un ordenador clásico y ensayásemos una hipotética solución elegida al azar: en uno y otro caso, nuestra información se reduciría a esa hipotética solución.

Por fortuna, quedan todavía teclas que tocar para extraer alguna ventaja de nuestras partículas cuánticas. Las amplitudes pueden cancelarse mutuamente cuando las que son positivas se combinan con las negativas, fenómeno conocido como interferencia destructiva. Así pues, un buen algoritmo cuántico aseguraría que las sendas computacionales conducentes a respuestas erróneas se cancelasen de ese modo. Debería también garantizar que las conducentes a soluciones correctas tuvieran todas ellas amplitudes del mismo signo, lo que resultaría en una interferencia constructiva y reforzaría, en consecuencia, la probabilidad de encontrarlas cuando se midiesen las partículas al final del proceso.

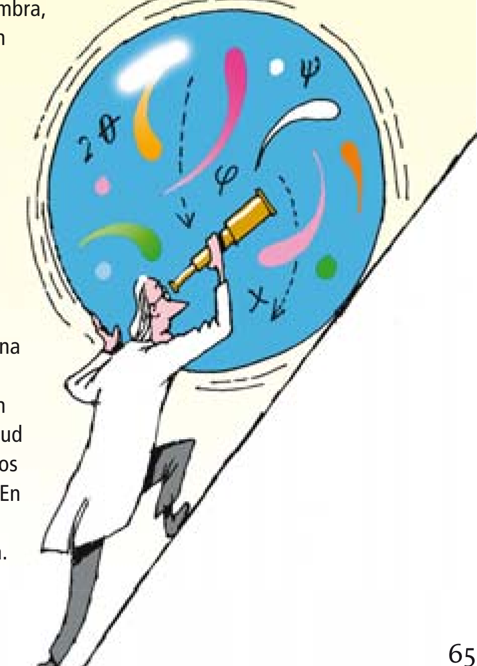
¿Para qué clase de problemas computacionales podemos organizar esta clase de interferencia, utilizando un menor número de pasos que los necesarios para resolver el problema por medios clásicos?

El primer ejemplo de algoritmo cuántico capaz de acelerar de forma impresionante la so-

La buena noticia

Si una computadora cuántica ideal y de gran tamaño sufriese las mismas limitaciones que afectan a los ordenadores clásicos, ¿deberían los físicos que tratan de construir computadoras cuánticas —labor de dificultad extraordinaria, incluso para las más rudimentarias— recoger sus trastos e irse a casa? Estoy convencido de que no, por cuatro razones.

- Si las computadoras cuánticas llegan a ser realidad algún día, su aplicación básica no consistirá en descifrar códigos, sino en algo, que de puro evidente, apenas se menciona: la simulación de fenómenos cuánticos. Se trata de un problema fundamental en química, en nanotecnia y en otros campos; tan importante, que se han concedido premios Nobel incluso por progresos parciales.
- Conforme los transistores de los microchips se aproximan a dimensiones atómicas, es probable que las ideas procedentes de la computación cuántica adquieran relevancia para la computación clásica.
- Los experimentos de computación cuántica concentran la atención sobre las más desconcertantes peculiaridades de la mecánica cuántica. Abrigo la esperanza de que cuantos menos de estos enigmas tengamos que ocultar bajo la alfombra, más habrán de ser quienes se vean obligados a comprenderlos.
- Se puede considerar que la computación cuántica sería la verificación más estricta a la que nunca haya sido sometida la propia mecánica cuántica. A mi modo de ver, el más apasionante de los posibles resultados de la investigación en computación cuántica consistiría en descubrir una razón fundamental por la que las computadoras cuánticas *no* fueran posibles. Un fracaso de tal magnitud volvería del revés la imagen que nos hemos formado del mundo físico. En cambio, el éxito en construirlas se limitaría meramente a confirmarla.



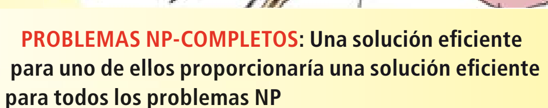
Capacidades y limitaciones de los ordenadores clásicos

En las ciencias de cómputo, los problemas se categorizan de acuerdo con el número de pasos computacionales que exigiría la resolución de un ejemplo grande del problema utilizando el mejor algoritmo conocido. Los problemas se agrupan, según su dificultad, en amplias clases, no mutuamente excluyentes. Adjuntamos tres de las principales. Contrariamente a lo que se proclama sin fundamento, no está demostrado que las computadoras cuánticas puedan resolver la clase de problemas muy difíciles a los que se clasifica como NP-completos.

PROBLEMAS P: Problemas que los ordenadores pueden resolver en tiempo polinómico
Ejemplo: Dado un mapa en el que figuran *n* ciudades, ¿se podrá ir desde una ciudad hasta cualquier otra? En el caso de un valor grande de *n*, el número de pasos que necesita el ordenador para resolver el problema aumenta en proporción a n^2, un polinomio. Dado que los polinomios crecen a velocidad relativamente lenta cuando *n* aumenta, los ordenadores pueden resolver problemas muy grandes de tipo P en unos tiempos razonables.

PROBLEMAS NP: Problemas cuya solución es fácil de comprobar
Ejemplo: Se sabe que un cierto número de *n* dígitos es el producto de dos números primos grandes, y deseamos hallar esos dos factores primos. Si se nos proporcionan los factores, podemos comprobar —multiplicándolos— que son la solución. El tiempo consumido en la comprobación es polinómico.

Todo problema P es también un problema NP, por lo que la clase NP integra en sí a la clase P. Se conjetura que el problema de la factorización queda fuera de la clase P, porque no se conoce ningún algoritmo mediante el cual un ordenador común pueda resolverlo en un número polinómico de pasos. Antes bien, el número de pasos aumenta exponencialmente al aumentar *n*.



PROBLEMAS NP-COMPLETOS: Una solución eficiente para uno de ellos proporcionaría una solución eficiente para todos los problemas NP
Ejemplo: Dado un mapa, ¿será posible colorearlo con sólo tres tintas, sin que haya territorios contiguos del mismo color? Si se dispusiera de un algoritmo que resolviera eficientemente este problema, podría adaptarse el algoritmo de marras para resolver cualquier otro problema NP (como el problema de descomposición factorial, recién mencionado, o la averiguación de si se pueden encajar *n* cajas de diversos tamaños en un cajón de dimensiones conocidas). En este sentido, los problemas NP-completos constituyen los problemas NP de máxima dificultad. No se conoce ningún algoritmo capaz de resolver eficientemente un problema NP.

lución de un problema práctico fue descubierto por Peter Shor en 1994. Shor demostró que una computadora cuántica podría factorizar un número de *n* dígitos en una secuencia de pasos cuya longitud creciese solamente como n^2, es decir, en tiempo polinómico. Según hemos mencionado, en el mejor de los algoritmos conocidos para computadoras clásicas el número de pasos crece exponencialmente.

Cajas negras

Así pues, al menos para la descomposición en factores, aplicando métodos cuánticos se puede lograr una aceleración exponencial sobre los algoritmos clásicos conocidos. Pero ni está demostrado, ni parece que el problema de la descomposición en factores sea NP-completo, pese a que muchos crean que lo es. Shor, para construir su algoritmo, se valió de ciertas propiedades matemáticas de los números compuestos y de sus divisores; resultaban particularmente idóneas para producir el tipo de interferencia constructiva o destructiva del que puede sacar partido un ordenador cuántico. Los problemas NP-completos no parecen compartir estas propiedades especiales. Hasta la fecha, sólo se han hallado unos pocos algoritmos cuánticos que, al parecer, podrían permitir aceleraciones que rebajasen en ciertos problemas los tiempos, llevándolos de exponenciales a potenciales.

La cuestión, pues, sigue abierta. ¿Existe un algoritmo cuántico eficiente, capaz de resolver problemas NP-completos? Aunque se ha puesto en ello gran empeño, no se ha descubierto ningún algoritmo de ese tipo, si bien —no puede sorprender— tampoco se ha demostrado que no exista. Después de todo, ni siquiera podemos demostrar que no existe un algoritmo clásico de tiempo polinómico capaz de resolver problemas NP-completos.

Lo que sí podemos afirmar es que un algoritmo cuántico capaz de resolver eficientemente problemas NP-completos tendría que sacar partido, como el algoritmo de Shor, de la estructura del problema, pero debería hacerlo por métodos que caerían mucho más allá de las técnicas disponibles. No es posible lograr una aceleración exponencial tratando los problemas como si fuesen "cajas negras" que careciesen de estructura, consistentes en un número exponencial de soluciones que habría que verificar en paralelo. Sí se podría conseguir, no obstante, una cierta aceleración con este enfoque de caja negra; los expertos en computación han determinado exactamente cuánta y cuáles son sus limitaciones. El algoritmo que produce la aceleración es el segundo en importancia de los principales algoritmos cuánticos.

Como ilustración de la metodología de "cajas negras" supongamos que se busca la solución de un problema difícil y que la única operación que se sabe realizar consiste en ir probando presuntas soluciones y ver si funcionan. Supongamos que existan S posibles soluciones y que el número S crece exponencialmente al aumentar el tamaño n del problema. No es imposible que se tenga suerte y se atine con la solución a la primera, pero en el caso más desfavorable habría que efectuar S ensayos. Por término medio, el número de tanteos necesarios sería de $S/2$.

Supongamos ahora que fuese posible preguntar por todas las posibles soluciones que se hallan en superposición cuántica. En 1996, Lov Grover, de los Laboratorios Bell, desarrolló un algoritmo para hallar la solución correcta en un tal supuesto con sólo unos $\sqrt{S}$ pasos. Una aceleración que rebaja desde $S/2$ hasta $\sqrt{S}$ constituye un avance de interés en ciertos problemas, pues si hay un millón de posibles soluciones, el número de pasos necesarios rondaría en torno a 1000, en lugar de 500.000. Pero la raíz cuadrada no transforma el tiempo exponencial en tiempo polinómico: produce, sencillamente, una exponencial más pequeña. Y el algoritmo de Grover es lo más que se puede lograr con este tipo de búsqueda de caja negra: en 1994 se había demostrado ya que cualquier algoritmo de caja negra necesita cuando menos $\sqrt{S}$ pasos.

A lo largo de los últimos diez años, se ha venido demostrando que aceleraciones de similar modestia señalan los límites para muchos otros problemas, amén de la búsqueda de una lista: el recuento de votos en unas elecciones, la determinación de la ruta más corta en un mapa o los juegos de estrategia, como el ajedrez o el Go. Un problema que planteaba especial dificultad era el llamado problema de la colisión, que consiste en hallar dos elementos idénticos —que "colisionan"— en una lista extensa. De existir un algoritmo rápido para resolver este problema, muchos de los bloques constructivos básicos del comercio electrónico perderían su utilidad en un mundo provisto de computadoras cuánticas.

El examen de una lista en busca de un elemento determinado viene a ser como dar con una aguja en un pajar, mientras que la búsqueda de una colisión es como buscar dos pajitas que sean idénticas, problema con un tipo de estructura del que una computadora cuántica podría sacar partido. Sin embargo, ya demostré en 2002 que, con el modelo de cajas negras, cualquier algoritmo cuántico requiere un tiempo exponencial para resolver el problema de la colisión.

Hay que reconocer que estas limitaciones de las cajas negras no descartan que haya aún por descubrir algoritmos cuánticos eficientes para problemas NP-completos, si no más arduos. Mas, si tales algoritmos existiesen, tendrían

El autor

Scott Aaronson es profesor de ingeniería eléctrica y ciencia de la computación en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En su momento abandonó los estudios de bachillerato; sin embargo, acabó licenciándose en la Universidad Cornell y doctorándose en ciencia de la computación por la Universidad de California en Berkeley, bajo la dirección de Umesh Vazirani.

Las computadoras cuánticas encuentran su lugar

El mapa de la derecha representa de qué forma se relacionaría la clase de problemas que los ordenadores cuánticos podrían resolver (BQP) con otras clases de problemas computacionales. (El contorno irregular expresa que la clase BQP no parece encajar pulcramente con las otras clases.)

La clase BQP (la sigla denota *bounded-error, quantum, polynomial time*, es decir, error acotado, cuántico, tiempo polinómico) contiene a todos los problemas de tipo P y también a unos cuantos problemas NP, como el de la factorización o el llamado problema del logaritmo discreto. Se cree que la mayoría de los demás problemas NP y NP-completos caen fuera de la clase BQP, lo que significa que incluso un ordenador cuántico necesitaría más que un número polinómico de pasos para resolverlos.

Por otra parte, los problemas BQP podrían desbordar la clase NP: las computadoras cuánticas podrían resolver ciertos problemas en menos tiempo incluso del que invertiría un ordenador común en comprobar la solución. (Recordemos que un ordenador común puede comprobar eficientemente la solución de un problema NP, pero sólo puede resolver eficientemente los problemas P.) Hasta la fecha, sin embargo, no se conocen ejemplos convincentes de problemas de este tipo.

Los expertos en computación sí saben que la clase BQP no puede extenderse más allá de la clase conocida como P-ESPACIO, que también contiene todos los problemas NP. Los problemas P-ESPACIO son los que un ordenador común puede resolver con una cantidad polinómica de memoria, aunque tal vez exijan un número exponencial de pasos.

ZONAS DE PENSAMIENTO

A diferencia del mundo real, en el cual creemos que los límites computacionales son los mismos dondequiera que se mire, la galaxia de *A Fire Upon the Deep* ("Un fuego sobre el abismo"), novela de ciencia ficción de Vernor Vinge publicada en 1992, está dividida en tres "zonas de pensamiento" concéntricas que poseen límites computacionales y técnicos inherentemente distintos.

En las Profundidades sin pensamiento, las más cercanas al núcleo galáctico, fallan hasta los automatismos sencillos. Los cocientes de inteligencia son ínfimos.

La Zona lenta contiene a la Tierra y tiene las limitaciones que sabemos.

En el Allende, factorías nanotécnicas cuasisentientes construyen maravillas tales como tejidos antigravitatorios y la hipercomputación permite viajar más velozmente que la luz.

La Trascendencia está poblada por peligrosos seres ultrainteligentes y divinales, que poseen técnicas y procesos de pensamiento insondables para los seres de menor rango.

que aprovechar la estructura del problema de formas muy dispares de todo cuanto hayamos visto, de igual modo que deberían hacerlo los algoritmos eficientes de corte clásico. La magia cuántica, por sí sola, no bastaría. Partiendo de esta idea, son muchos ahora los científicos de la computación que conjeturan no sólo que P ≠ NP, sino también que las computadoras cuánticas no podrían resolver problemas NP-completos en tiempo polinómico.

Teorías mágicas

Por lo que sabemos, los ordenadores cuánticos constituirían la estación término de la computación, la categoría más general de computadoras compatibles con las leyes de la física. Pero no hay todavía una teoría definitiva de la física, por lo que no se puede descartar que algún día una teoría futura descubra un procedimiento físico que resuelva eficientemente problemas NP-completos. Como cabe esperar, no faltan quienes hacen cábalas acerca de clases de computadoras todavía más potentes, algunas de las cuales harían que los ordenadores cuánticos pareciesen tan vulgares como una máquina expendedora. Sin embargo, habrían de basarse en hipotéticos cambios de las leyes de la física.

Una de las características fundamentales de la mecánica cuántica es la linealidad, una propiedad matemática. Daniel S. Abrams y Seth Lloyd demostraron en 1998, mientras estaban en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, que si las ecuaciones de la mecánica cuántica contasen con un pequeño término no lineal, los ordenadores cuánticos podrían resolver eficientemente problemas NP-completos. Antes de que empecemos a soñar, debe entenderse que, de existir semejante término no lineal, podría infringirse también el principio de indeterminación de Heisenberg y resultaría posible enviar señales a mayor velocidad que la de la luz. Como señalaban los propios Abrams y Lloyd, la mejor interpretación de estos resultados quizá sea decir que contribuyen a explicar por qué la mecánica cuántica es lineal.

Otro tipo de máquina conjetural que lograría una capacidad computacional fabulosa sería la que condensase un número infinito de pasos en un tiempo finito. Por desgracia, el tiempo, al menos según enseña la física actual, degenera en un mar de fluctuaciones cuánticas (en una espuma, en vez de extenderse por una línea lisa, continua y uniforme) a la escala de 10^{-43} segundos (el "tiempo de Planck"), lo que tornaría imposible ese tipo de máquina.

Aunque no resulte posible subdividir el tiempo tanto cuanto se quiera, tal vez otra vía para resolver eficientemente los problemas NP-completos consista en viajar por el tiempo. Quienes estudian el problema no hablan de máquinas del tiempo, sino de curvas de tipo tiempo cerradas (CTC). En esencia, una CTC consiste en una ruta a través del espacio y el tiempo a lo largo de la cual podría viajar materia o energía para reunirse consigo misma en el pasado, generando un bucle cerrado. La teoría física actual no es concluyente sobre la posibilidad de las CTC, pero eso no debería impedir que nos preguntásemos cuáles serían —de existir— sus consecuencias para las ciencias del cómputo.

Parece evidente de qué forma se podría utilizar una CTC para acelerar un cálculo: prográmese nuestro ordenador para que dedique todo el tiempo que haga falta a resolver el problema y seguidamente envíese la solución de vuelta hasta un instante anterior al arranque del ordenador. Es una pena que tan sencilla idea no funcione. Olvida la famosa paradoja del abuelo: remontarse en el tiempo para matar al propio abuelo (así que no naceríamos, con lo que no podríamos retroceder en el tiempo; nuestro abuelo, al fin y al cabo, vivió y tuvo hijos, y después nacimos nosotros, pero entonces...). En nuestro supuesto: ¿qué ocurriría si apagásemos la computadora en cuanto recibiéramos su respuesta remitida desde el futuro?

En 1991, el físico David Deutsch, de la Universidad de Oxford, definió un modelo de computación con curvas de tipo tiempo cerradas que elude esta dificultad. En el modelo de Deutsch, la naturaleza garantizaría que conforme se desarrollasen los acontecimientos a lo largo de la línea del tiempo que compone la CTC no llegaran nunca a aparecer parado-

¿Ultracomputadoras llegadas de una física exótica?

Parece inverosímil que las computadoras cuánticas puedan resolver rápidamente problemas NP-completos. Pero otros procesos físicos, extraordinarios, muy hipotéticos, podrían consentir la construcción de máquinas computadoras dotadas de semejante capacidad, y de mucho más. Los viajes por el tiempo permitirían resolver cualquier problema del P-ESPACIO, sin olvidar los que son más difíciles que los NP-completos, como, por ejemplo, jugar la partida de ajedrez perfecta en tableros de cualquier tamaño, y no sólo en los normales de 8 × 8. Aunque el recurso a viajes por el tiempo para resolver problemas no consistiría en un mero lograr que un ordenador completase un largo cómputo en el futuro lejano y se enviase luego la solución a sí mismo en el presente, podría sacarse partido de esa clase de bucle en espacio-tiempo. Un inconveniente: tales procesos desafían las leyes conocidas de la física.



¿Un nuevo principio físico?

Dado que para construir una computadora capaz de resolver problemas NP-completos parece necesario apelar a propiedades físicas inverosímiles (como los viajes por el tiempo), yo pronostico que los científicos adoptarán algún día un nuevo principio: "Los problemas NP-completos son intrínsecamente difíciles". Es decir, la resolución eficiente de estos problemas es imposible en cualquier dispositivo que pueda construirse en el mundo real, cualesquiera resulten ser finalmente las leyes de la física. Tal principio entraña la imposibilidad de los viajes por el tiempo, pues tales viajes permitirían la creación de ultracomputadoras capaces de resolver eficientemente problemas NP-completos. Más todavía, si se demostrase que una teoría propuesta permitiría la construcción de tales computadoras, dicha teoría podría ser descartada *a priori*. La aplicación del principio sería similar a recurrir a los principios termodinámicos para concluir que las máquinas de movimiento perpetuo son imposibles (están prohibidas por las leyes de la termodinámica) y para deducir características hasta entonces desconocidas de procesos físicos.

jas. Esta circunstancia podría utilizarse para programar un ordenador que trazase un bucle temporal por una CTC con el fin de resolver problemas difíciles.

Con una CTC podríamos resolver eficientemente no sólo problemas NP, sino incluso problemas pertenecientes a una clase más amplia, la clase P-ESPACIO. El P-ESPACIO está constituido por la clase de problemas que podrían resolverse en un ordenador corriente utilizando una cantidad de memoria con crecimiento polinómico, aunque exigieran un tiempo de ejecución con crecimiento exponencial. En efecto, una CTC haría que el tiempo y el espacio fuesen intercambiables en cuanto recursos computacionales. (No hubo necesidad de mencionar hasta ahora la limitación polinómica de la memoria porque para los problemas P y NP no tiene importancia si el ordenador dispone de más memoria que la polinómica.)

Recientemente, John Watrous, de la Universidad de Waterloo en Ontario, y yo hemos demostrado que aunque en una CTC se emplease un ordenador cuántico, por uno clásico, tampoco se podría computar eficientemente ningún problema situado extramuros del P-ESPACIO. Con otras palabras: aunque existieran las curvas de tipo tiempo cerradas, las computadoras cuánticas no se mostrarían más potentes que las clásicas.

Criptonita computacional

Se ignora si futuras teorías llegarán a consentir alguna de estas máquinas tan extraordinarias. Pero, sin negar nuestra ignorancia, podemos ver esta ignorancia desde una perspectiva diferente. En lugar de partir de teorías físicas para preguntarnos cuáles serían sus consecuencias para la computación, podríamos empezar suponiendo que los problemas NP-completos son intrínsecamente difíciles y estudiar después las consecuencias que tal hipótesis tendría para la física. Por ejemplo, si las CTC permitiesen la resolución eficiente de problemas NP-completos y parejamente se admitiera que los problemas NP-completos son intratables, la consecuencia sería que las CTC no pueden existir.

Habrá quienes consideren que tal metodología es superlativamente dogmática. En mi sentir, no difiere de aceptar la validez del segundo principio de la termodinámica o la imposibilidad de la comunicación a velocidad mayor que la de la luz, dos limitaciones que inicialmente tuvieron carácter técnico y que adquirieron con el tiempo el rango de principios físicos. Cierto: cabe la posibilidad de que la segunda ley sea falsada experimentalmente en el futuro. Pero mientras no ocurra, resulta inmensamente más útil suponer que es correcta y aplicar esa hipótesis al estudio de toda clase de cuestiones, desde los motores hasta los agujeros negros. Yo pronostico que la dificultad de los problemas NP-completos recibirá algún día igual consideración: la de un principio fundamental que describe una parte esencial de la naturaleza. No hay forma de saber qué luz teorética arrojará en el futuro la aplicación de un principio fundamental de esta clase, ni las consecuencias prácticas que podría comportar.

En el ínterin, sabemos que no se han de esperar resultados mágicos de las computadoras cuánticas. Habrá quien se sienta decepcionado ante sus aparentes limitaciones. Podemos, sin embargo, darles a estas limitaciones un giro más optimista. Si bien ciertos sistemas criptográficos podrán ser descerrojados en un mundo dotado de computadoras cuánticas, es probable que otros códigos siguiesen siendo seguros. Aumenta así nuestra confianza en que la computación cuántica será posible, pues cuanto más fantástica nos parezca una técnica, mayor deberá ser nuestro escepticismo.

Por último, tales limitaciones aseguran que los científicos de la computación seguirán teniendo tela cortada con la que confeccionar nuevos algoritmos cuánticos. Lo mismo que Aquiles sin su talón o que Supermán sin la criptonita, una computadora carente de limitaciones no tardaría en resultar muy aburrida.

Bibliografía complementaria

QUANTUM COMPUTATION AND QUANTUM INFORMATION. Michael A. Nielsen e Isaac L. Chuang. Cambridge University Press, 2000.

NP-COMPLETE PROBLEMS AND PHYSICAL REALITY. Scott Aaronson en *ACM SIGACT News*, Sección de Teoría de Complejidad, vol. 36. n.º 1. págs. 30-52; marzo de 2005.

QUANTUM COMPUTER SCIENCE: AN INTRODUCTION. N. David Mermin. Cambridge University Press, 2007.

SHOR, I'LL DO IT. (Una explicación del algoritmo de Shor para el no especialista). Scott Aaronson. Disponible en www.scottaaronson.com/blog/?p=208

QUANTUM COMPUTING SINCE DEMOCRITUS. Notas para el curso PHYS771, University of Waterloo, Otoño de 2006. Disponible en www.scottaaronson.com/democritus/

DIFICULTADES DE LA EPIDE

El mayor estudio sanitario jamás realizado en plantas industriales aplica técnicas punteras para investigar un aparente conglomerado de casos de cáncer • Carole Bass

En los tiempos de John Shea y John Greco, la cavernosa fábrica de Pratt & Whitney Aircraft se llenaba de una niebla grasienta que rezumaba de las fresadoras y empapaba techos y paredes. Y a los propios operarios, que volvían a casa impregnados de acre aceite industrial. Las piezas de los motores se desengrasaban en el suelo de la planta, en fosos llenos de disolvente; con aspersores de disolvente se limpiaban los obreros las manos y la ropa. Durante 34 años, Shea estuvo fresando álabes de motores en aquella factoría de cien mil metros cuadrados de North Haven, Connecticut. En 1999, a los 56 años, se le diagnosticó un cáncer en el cerebro. Seis meses después, Greco, su amigo y compañero de trabajo, supo que padecía la misma enfermedad: un glioblastoma multiforme, el más agresivo de los tumores cerebrales. Al cabo de un año del primer diagnóstico, ambos trabajadores habían muerto: sus viudas empezaban ya a preguntar por qué se producía un número tan alto de ese cáncer maligno en una de las principales fabricas de motores a reacción del mundo.

En 2001 empezó una investigación acerca de un conglomerado de cánceres cerebrales aparecido en North Haven; sólo en la década anterior se habían dado 13 casos de tumores cerebrales primarios malignos entre los trabajadores, 11 de ellos glioblastomas. Se ha convertido en el más completo estudio de salud en el trabajo jamás emprendido. El equipo dirigido por Gary Marsh, de la Universidad de Pittsburgh, y Nurtan Esmen, de la Universidad de Illinois en Chicago, ha acometido un trabajo penoso y policíaco: primero, rastrear un número todavía desconocido de casos de cáncer cerebral a lo largo de 50 años entre los casi 250.000 empleados de las ocho factorías de Pratt & Whitney; determinar después, siempre que sea posible, cuál podría haber sido la causa de esos tumores. Para ello se ha de reconstruir la exposición de los trabajadores a un montón de agentes potencialmente tóxicos. El grupo espera publicar sus primeros hallazgos en este mismo año y, en 2009, los resultados finales.

La impresionante labor logística de Marsh y Esmen ilustra la dificultad de efectuar estudios epidemiológicos en lugares de trabajo expuestos a multitud de sustancias posiblemente dañinas. La localización de las causas de las pasadas desgracias en Pratt & Whitney estará también limitada por la falta de conocimientos, tanto sobre la génesis de los tumores cerebrales como sobre la toxicidad de muchos compuestos químicos utilizados en la industria. El estudio, realizado con las técnicas más avanzadas, podría arrojar más luz en uno y otro aspecto. Pone, además, de relieve que determinar cuál es el grado de exposición seguro a ambientes tóxicos sigue siendo en gran medida un problema actual.

El Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos estima que en esa nación fallecen cada año, prematuramente, cerca de 49.000 personas por enfermedades laborales, ocho veces más que por accidentes de trabajo. Sin embargo, la mayoría de los límites de exposición segura implantados federalmente se basan en el bagaje científico de los años sesenta. De ahí que las nuevas directrices de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE.UU. rebajen hasta en 45.000 veces el nivel admisible de un producto químico en el aire exterior de una fábrica con respecto a los niveles seguros que para el aire interior ha regulado la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA).

Quizá los mayores obstáculos para actualizar la protección sanitaria en el trabajo no provengan de limitaciones científicas, sino de

CONCEPTOS BASICOS

- Durante siete años se han investigado casos de cáncer cerebral entre los trabajadores de Pratt & Whitney Aircraft en Connecticut. Es el estudio más extenso jamás emprendido sobre la salud en centros de trabajo: cerca de un cuarto de millón de empleados a lo largo de 50 años.
- La recogida de datos ha sido laboriosa por la extensión del estudio, pero la magnitud de la población analizada ha dado medios para detectar perfiles menos claros que pudieran sugerir un origen tumoral, incluidos los factores cancerígenos no reconocidos previamente.
- Más estudios de epidemiología industrial de este tipo podrían mejorar la protección sanitaria de los trabajadores, anticuada en muchos casos. Pero falta la financiación y el respaldo político para tales investigaciones.

JAMES PORTO (*cubo de Rubik*); JEN CHRISTIANSEN (*composición*); BETTMANN/CORBIS (*amarillo*); JAMES PORTO (*azul*); UNIVERSIDAD DE PITTSBURGH (*rojo y naranja*); DEPARTAMENTO DE PROTECCION AMBIENTAL DE CONNECTICUT (*verde*)

MIOLOGIA LABORAL



la política y la economía. La investigación de Pratt & Whitney revela asimismo cuánto podría mejorarse la epidemiología ocupacional si existiera voluntad política de aplicar la ciencia más actual a la tarea de asegurar la salubridad de los lugares de trabajo.

Acopio de pruebas

Cuando conocieron el diagnóstico común de sus maridos, Carol Shea y Kate Greco no sabían nada de cánceres cerebrales, ni de epidemiología. Pero les parecía una extraña coincidencia el que ambos sufrieran un mismo tipo —no frecuente— de tumor maligno. Empezaron a preguntar a la compañía cuántos otros trabajadores padecían cáncer en el cerebro y cuál podría haber sido la causa. Por agosto de 2001, una investigación del Departamento de Salud Pública de Connecticut encontró que la incidencia de glioblastoma entre los trabajadores de la planta de North Haven en los 10 años anteriores había sido entre 2,8 y

FORMACION DE LAS BASES DE DATOS

Para determinar si ha habido un número excesivo de casos de cáncer de cerebro entre los trabajadores de Pratt & Whitney Aircraft, y si así fue, por qué causas, se han compilado durante más de cinco años enormes cantidades de información sobre todos los trabajadores y procesos de fabricación de la compañía en Connecticut a lo largo de un período de 50 años. Uno de los dos equipos de investigación se dispuso a identificar la población en estudio —la cohorte— y determinar cuántos de ellos desarrollaron cáncer cerebral: para ello clasificaron y agruparon más de un cuarto de millón de nombres de empleados. Mientras tanto, el otro equipo seleccionaba una gran variedad de posibles causas para reconstruir a qué sustancias se habían expuesto los trabajadores entre los años 1952 y 2001 en el transcurso de su trabajo.

Este medio millón de hojas representa las páginas guardadas en los archivos del personal que han explorado los investigadores de la Universidad de Pittsburgh para compilar listas e informaciones sobre trabajadores.

JAMES PORTO

7 veces mayor que la esperada, dependiendo de las hipótesis de partida.

En aquel momento, el departamento de salud del estado exigió a Pratt & Whitney, que ha declinado comentar este punto, la contratación de un epidemiólogo independiente para proseguir la investigación. La compañía recurrió entonces a Marsh, bioestadístico de la Escuela de Posgrado de Salud Pública de Pittsburgh. Su especialidad son las investigaciones sobre la salud laboral que él llama "intrincadas y laboriosas", en las que hay que tener en cuenta a miles de empleados ubicados en múltiples sitios. Marsh contactó inmediatamente con Esmen, frecuente colaborador suyo y experto en la evaluación y reconstrucción de riesgos en ambientes de trabajo.

Ambos comenzaron a investigar la factoría de North Haven, que se cerró en 2002. Pero cuando se enteraron de que la firma realizaba en su fábrica principal de East Harford operaciones de fresadura similares a las de North Haven y trabajos de diferentes tipos en otras instalaciones de Connecticut, decidieron estudiar a la vez las ocho plantas del estado, las abiertas y las clausuradas. Así pues, un estudio en principio concebido para unos 100.000 empleados se amplió hasta los cerca de 250.000 que habían trabajado allí entre 1952 y 2001. Suponía un monto total de 12 millones de dólares a lo largo de siete años.

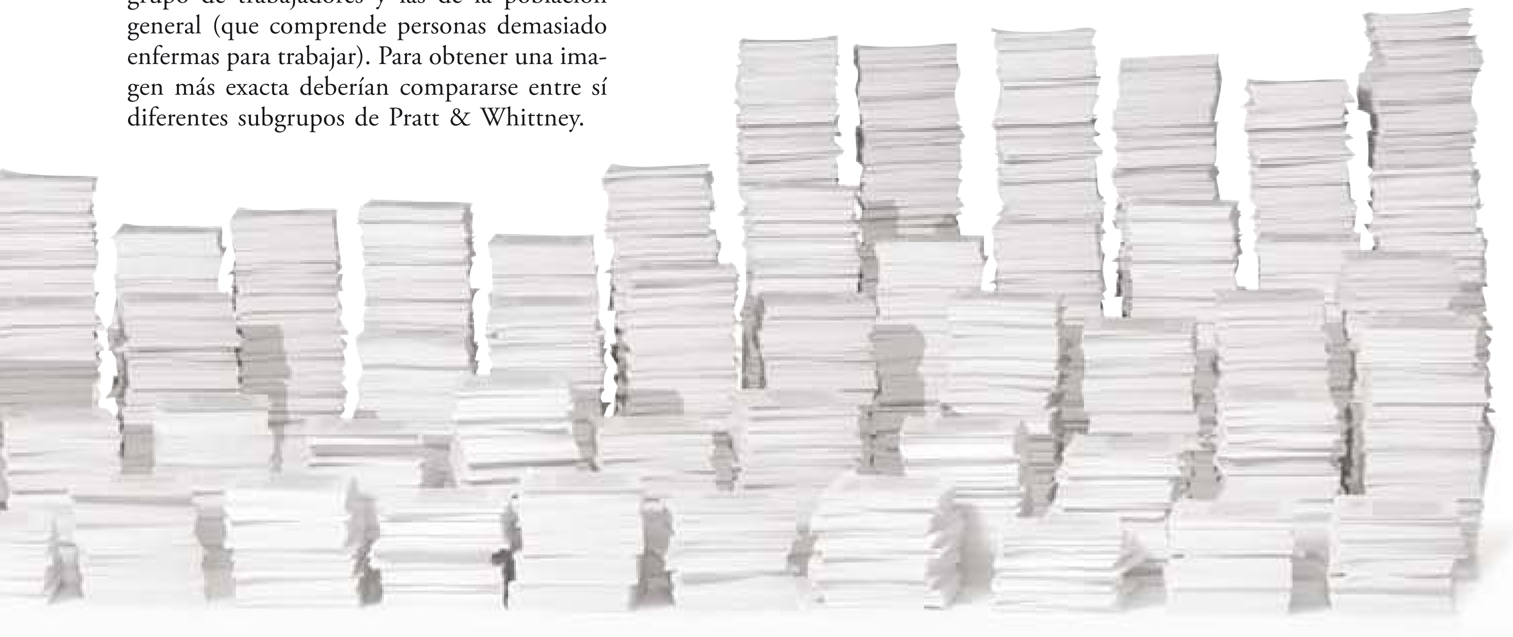
Según Marsh, el mayor alcance del proyecto aportaba dos ventajas científicas. Primero, un valor estadístico superior, que reduce el riesgo de falsos resultados negativos y eleva la probabilidad de detectar perfiles menos acusados; segundo, unas mejores comparaciones internas de métodos de trabajo, exposición a riesgos y repercusiones en la salud. La epidemiología ocupacional a menudo padece el efecto del "trabajador sano": una comparación engañosa entre las tasas de morbilidad detectadas en un grupo de trabajadores y las de la población general (que comprende personas demasiado enfermas para trabajar). Para obtener una imagen más exacta deberían compararse entre sí diferentes subgrupos de Pratt & Whittney.

La enorme dimensión del estudio representa también uno de los mayores desafíos. Dirigidos por Jeanine Buchanich, los empleados y contratados de Pitt pasaron un año en las instalaciones de Pratt & Whitney explorando medio millón de páginas de historiales del personal y resumiéndolas en una base de datos que reúne los datos sobre la salud de los trabajadores. Seguidamente, Buchanich comenzó a rastrear los nombres de unas 266.000 personas —la "cohorte"— en las bases de datos nacionales para saber los empleados que habían muerto y por qué causas. Un programador escribió un protocolo para muestrear nombres de las listas de afiliación a sindicatos, que luego Buchanich cotejó con la cohorte para ver si se había omitido a alguien. También tuvo que rectificar entradas en la base de datos cuando las fechas eran incongruentes, del tipo un empleado contratado antes de su nacimiento o después de su defunción. "El archivo de la cohorte ha quedado muy depurado", dice Buchanich —al 99,9 por ciento de veracidad—, "pero todavía hay unos doscientos errores que examinar y resolver". Tras su eliminación y el posterior refinamiento de la base de datos, la cohorte comprende ahora unos 224.000 trabajadores.

Mientras tanto, Zb Bornemann, ha venido persiguiendo casos de cáncer cerebral. Cotejó la cohorte entera con el Indice de Mortalidad Nacional y el Indice de Mortalidad de la Seguridad Social. Y prosigue la búsqueda en registros de cánceres en estados de todo el país, averiguando si algún nombre de la cohorte coincide con el de una persona registrada como enferma de tumor cerebral. Cuando aparece una coincidencia, Bornemann intenta localizar a los parientes más próximos por medio de bases de datos interactivas. Algunos registros son un callejón sin salida. En el estado de Washington, Bornemann presentó seis tandas

DEFINICION DE UN CONGLOMERADO DE CANCERES

Puede ser casual que durante cierto período de tiempo se produzca un número inusitado de cánceres entre personas que viven o trabajan juntas. Pero este aparente conglomerado podría también deberse a un origen común de tales dolencias. La parte del análisis de Pratt & Whittney que analiza la mortalidad utilizará técnicas estadísticas "para determinar si el número total de tumores cerebrales malignos, benignos o ambos, observados es mayor que el valor esperado tomando como base las comparaciones normalizadas con la población general de EE.UU., la del estado de Connecticut y la de los condados de procedencia de los trabajadores, así como para determinar si cualquier exceso registrado pudiera deberse sólo a factores casuales."





TRABAJADORES de la factoría de Pratt & Whitney Aircraft en East Harford preparan un motor a reacción para el Boeing 727 que iba a probarse en julio de 1961. Esta es una de las ocho fábricas de Connecticut investigadas por casos de cáncer cerebral entre los empleados de la compañía.

de solicitudes de información sobre pacientes de cáncer, pero incluían un documento rechazado porque iba dirigido al registro de cánceres del estado y no al departamento de sanidad, que alberga dicho registro. Una vez localizado un pariente muy próximo de un determinado caso, incluso una persona viva afectada de cáncer en el cerebro, Bornemann le escribe solicitando su participación en el estudio: una entrevista telefónica, la entrega de su historial clínico y el permiso para analizar tejidos de ese tumor cerebral.

El hallazgo de casos clínicos compone la primera parte del estudio —el análisis de mortalidad—, que determinará si la proporción de cánceres cerebrales u otras patologías entre los trabajadores de Pratt & Whitney, en su totalidad y en diversos subgrupos, fue mayor de la esperada. La segunda parte es un estudio "anidado" de controles y casos, en el que se compara cada caso de cáncer cerebral con otro empleado de Pratt & Whitney, de la misma edad, sexo y antigüedad en la compañía, que no haya desarrollado tumor cerebral alguno. Al comparar sus historias clínicas y de actividad laboral, incluida la evaluación de riesgos que lleva a cabo Esmen en la Universidad de Chicago, se espera encontrar perfiles que puedan explicar por qué a unas personas se les formaron tumores en el cerebro y a otras no.

En la tercera parte del estudio, Frank Lieberman analiza las mutaciones génicas en los tejidos tumorales de los trabajadores afectados. El hallazgo de un perfil distintivo podría sugerir que los tumores aparecidos en Pratt & Whitney no fueron fruto del azar, sino de alguna causa común.

Ahí se recurre a técnicas científicas nuevas. El trabajo de Lieberman se centra en los tejidos tumorales conservados en parafina durante años en los hospitales donde fueron operados los pacientes de cáncer de Pratt & Whitney. Hasta hace muy poco, sólo podían aplicarse métodos que no permiten examinar más de 15 o 20 genes por muestra para detectar mutaciones asociadas al crecimiento de tumores. Hoy día, merced a una técnica más avanzada, se hacen análisis en micromatrices, antes sólo posibles sobre tejidos en fresco. Se pueden así examinar miles de genes a la vez, en busca de mutaciones pequeñas, así como de duplicaciones o supresiones de genes enteros; ahora cabe buscar "alteraciones en los perfiles de actividad génica, ya no en genes específicos", como dice Lieberman.

Este neuro-oncólogo compara los perfiles encontrados con una base de datos del Instituto Nacional del Cáncer y con muestras de tumores cerebrales obtenidas de los pacientes de su clínica de Pittsburgh, a modo de control. "La técnica es de suma eficacia", asegura, en parte porque "no se necesita una hipótesis inicial sobre cuáles son los genes importantes".

Una colega suya de Pittsburgh, Emanuela Taioli, aplica técnicas moleculares semejantes para identificar el daño que infligen al ADN carcinógenos bien conocidos. Ambos grupos colaboran en un proyecto piloto, consistente en recoger tejidos normales de los trabajadores de Pratt & Whitney afectados de cáncer cerebral. Su propósito es detectar posibles cambios moleculares en esos tejidos y correlacionarlos con los carcinógenos a cuya acción se exponen los empleados de la empresa, según el equipo de Esmen. En principio, estos vestigios de la exposición a sustancias tóxicas podrían denunciar el desarrollo precoz de un cáncer. Lieberman, sin embargo, advierte de que tales métodos se asientan en cimientos científicos todavía recientes: "Se intenta aprovechar la enorme dimensión y el refinamiento que ofrece la epidemiología para conseguir la máxima información sobre los agentes capaces de desencadenar un cáncer cerebral. Las propias técnicas aplicadas son, en el más hondo sentido, experimentales".

La autora

Carole Bass es periodista especializada en investigaciones sobre salud pública, temas legales y medio ambiente.



Arqueología industrial

El trabajo del grupo de Esmen en Chicago, aunque menos experimental, es igualmente inmenso. Durante cinco años han escudriñado las operaciones de Pratt & Whitney desarrolladas entre las décadas de los cincuenta y los noventa, intentando imaginar a qué agentes estuvieron expuestos los trabajadores y en qué niveles. “Si no se encuentran datos, habrá que reconstruirlos”, señala Esmen, profesor de ciencias de la salud ocupacional y ambiental en la Universidad de Illinois en Chicago. “Es casi arqueología industrial.”

La indagación habría sido más fácil si el equipo hubiese sabido qué estaba buscando. Hace mucho tiempo que se sospecha que algunos cánceres del cerebro tienen un origen laboral. Pero la única causa comprobada es la radiación ionizante que generan algunas operaciones de Pratt & Whitney. Por lo demás, anteriores estudios habían señalado elevados índices de cáncer cerebral entre quienes trabajaban con ciertos metales, aceites industriales y disolventes, pero no se ha podido reproducir fehacientemente estos resultados.

Para investigar en los archivos de Pratt & Whitney, el equipo de Esmen está concentrando 320.000 puestos de trabajo en un número manejable de categorías laborales. En cada categoría se cuantifica la exposición de los trabajadores a los agentes sospechosos durante diversos períodos de tiempo.

Con todo, los números tienen sólo un valor relativo. Lo que realmente importa son

OSHA SE HA QUEDADO ATRAS

Roger Hancock, miembro del equipo del estudio de Pratt & Whitney, explica que los actuales estándares de OSHA se basan en datos toxicológicos de 1968. OSHA inició su actividad en 1971 con un mandato legal: “Crear en la medida posible condiciones de trabajo seguras y saludables para todo hombre y mujer de la nación”. De un golpe adoptó unos límites de exposición permisible para unos 400 agentes químicos tomados directamente de las normas elaboradas en 1968 por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales, organización sin ánimo de lucro. Durante el resto de la década de 1970, OSHA estableció límites de exposición para otras nueve sustancias.

Pero en el decenio siguiente el tren de los límites de exposición permisibles descarriló. En 1980 el Tribunal Supremo de EE.UU. acabó con una norma de OSHA que reducía en un orden de magnitud el nivel admisible de benceno propuesta por OSHA, alegando así que este organismo tenía que demostrar que sus reglas evitaban “un riesgo apreciable de daño”. Sin definir “riesgo apreciable”, el tribunal sugería que una muerte más por cada 1000 trabajadores expuestos probablemente sería apreciable, pero dejaba de serlo una en mil millones. Desde entonces, OSHA ha considerado que 1 por 1000 constituye el estándar más riguroso posible. Ciertos límites permisibles de exposición toleran riesgos mucho peores; por ejemplo, el decretado en 2006 para el cromo hexavalente corresponde a un riesgo de 35 a 45 por 1000, según las estimaciones de OSHA.

En 1987 OSHA emprendió una radical actualización de sus límites para contaminantes del aire. En menos de dos años publicó los correspondientes a 376 sustancias químicas. Más de la mitad no eran sino versiones más rigurosas de los aplicados a las sustancias de la lista original de 1971; el resto se refería a sustancias de nueva regulación. Pero tanto la industria como los sindicatos se opusieron a la ley; en 1992 un tribunal federal de apelaciones la anuló: OSHA debería realizar procesos de estandarización para cada sustancia por separado, cosa que nunca llegó a hacer.

Pese a las dificultades científicas, la Conferencia de Higienistas Industriales continúa publicando cada año de 20 a 40 límites de exposición voluntarios, denominados valores límite de umbral. De ese modo suman ya más de 700 sustancias, comparados con las algo más de 400 que regula OSHA. “Esto no acaba nunca, porque siempre recibimos nueva información”, dice Terry Gordon, que dirige la tarea de los valores límites de umbral. “Somos unos voluntarios que hacemos lo que podemos. Si OSHA tomara la iniciativa, sería un día memorable.”

En respuestas a nuestra revista, OSHA pone de relieve que “no es nada sencillo actualizar límites de exposición”. Satisfacer las exigencias impuestas por el Congreso y los tribunales requiere “intensas investigaciones” y “notables recursos para determinar de modo adecuado cómo afectan los límites de exposición permisibles revisados a la salud de los trabajadores, y evaluar si de verdad se necesitan nuevos estándares que protejan eficazmente a los empleados en su lugar de trabajo y que los patronos puedan cumplir”. En cuanto al cromo hexavalente, OSHA declara que ha adoptado “el nivel mínimo que era factible”, tomando como base “la totalidad de las pruebas halladas en los registros de elaboración de normas”.

Pero algunos de los que trabajaban en OSHA creen que esta agencia podría hacer las cosas mucho mejor. Por ejemplo, Harry Ettinger, higienista industrial que en la época de Reagan dirigió la revisión de los límites de los contaminantes en la atmósfera. “Es vergonzoso”, exclama, “que la mayoría de los límites de exposición permisible todavía daten de 1968”. Considera que lo perfecto es enemigo de lo bueno. “Intenté convencer a los sindicalistas de que era una locura querellarse contra nosotros. Querían la perfección, pero la perfección no existe”.

Para Adam Finkel, que fue director de los estándares de salud de OSHA entre 1995 y 2000, el problema son las prioridades. “La mayoría de quienes saben de lo que hablan coincidirían en que del 80 al 90 por ciento de las muertes relacionadas con el trabajo se deben a problemas de salud ocupacional”, afirma. Sin embargo, “siempre ha primado la seguridad sobre la salud”. El mismo tuvo que dejar su puesto tras haber llamado la atención sobre los riesgos de salud laboral que acechaban a los propios inspectores de OSHA; finalmente recibió una sustanciosa indemnización de la Agencia. Lejos de domeñar la vena perfeccionista, Finkel cree que la Agencia tiene que ponerse a tono con la ciencia de nuestro tiempo. “Sabemos que los trabajadores se exponen a un sinnúmero de agentes cuyos niveles son mil veces superiores a los recomendables. Con tanta fruta madura que recoger, la primera prioridad de OSHA debería ser la higiene industrial a la antigua usanza”.

Sea como fuere, de alguna parte tienen que venir la “intensa investigación” y los “notables recursos” que OSHA señala como necesarios para actualizar la protección sanitaria de los trabajadores. En la mayoría de los casos, las industrias que estarían sujetas a las normas serían quienes pagarían los estudios. En el frente de la salud laboral, el presupuesto para investigación del Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional no ha aumentado, más bien ha disminuido. Y los fabricantes no sólo han combatido la regulación gubernamental, sino que, además, se han querellado contra la independiente Conferencia con la intención de que no publique sus límites voluntarios de exposición.

REALIDADES BREVES

- En EE.UU. cada día mueren una media de unos 16 trabajadores por lesiones en el trabajo y 134 por dolencias relacionadas con la ocupación.

- Se estima que cada día hay 11.500 trabajadores del sector privado que padecen una enfermedad o lesión no fatal de origen laboral.

- 9000 trabajadores son atendidos todos los días en salas de emergencia a causa de lesiones ocupacionales.

FUENTE: Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional

los órdenes de magnitud. Una exposición determinada se puede estimar en 10 unidades; podría ser de 6 o de 12, pero no de 100. Al no existir mediciones, los investigadores extrapolan a partir de entrevistas con trabajadores e ingenieros de la fábrica. Asimismo, manejan montañas de datos facilitados por la compañía, tales como los registros de compras (para deducir las cantidades de material utilizadas), estudios de rendimiento laboral (tiempo invertido en cualquier tarea determinada) en los años setenta, publicaciones internas con títulos tan peculiares como *Capacidad versátil de ingeniería y fabricación*, y resultados de muestreos del aire realizados por Pratt & Whitney a lo largo de los años.

La última fuente de información podría considerarse terreno abonado para la reconstrucción de las exposiciones a riesgos. Pero como señala Esmen, es más difícil de lo que parece. Un epidemiólogo que intentara evaluar las exposiciones de toda la plantilla laboral tendría que tomar muestras aleatorias de cada grupo de trabajo y reseñar los cambios de uno a otro turno o de un día a otro día. Un higienista industrial a quien se le pidiera resolver un problema —quejas de tipo respiratorio, por ejemplo— sólo tomaría muestras de la zona "problemática" y se ceñiría a considerar los niveles más altos registrados de una sustancia sospechosa.

Los textos de higiene industrial recomiendan a los futuros profesionales que tomen una gama de muestras completa, afirma Steve Lacey, que enseña estas técnicas a los estudiantes de doctorado de la Universidad de Chicago. En la realidad no se hace así. Roger Hancock, otro miembro del equipo que durante un cuarto de siglo practicó higiene industrial en el sector privado, conoce la verdad: "Llegas a una fábrica con tu carro lleno de equipos de prueba, y tienes una semana disponible. Quizá tal proceso se hace sólo una vez esa semana, de manera que no hay más que una oportunidad de tomar las muestras correspondientes. Si la muestra de nivel superior no alcanza el umbral de preocupación toxicológica, dejas de tomar nuevas muestras".

Para la mayoría de las empresas, "no alcanzar el umbral de preocupación" equivale al cumplimiento legal. Basta con que una instalación fabril satisfaga los estándares de la OSHA. Pero las autoridades en la materia y los libros de texto médicos reconocen que lo que es bueno para la OSHA no siempre basta para proteger la salud de los trabajadores.

No resulta fácil determinar límites para una exposición segura, reconoce Terry Gordon, presidente de la comisión de la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales que fija límites voluntarios de exposición a sustancias químicas. Al igual que OSHA, este grupo de unos 20 voluntarios no conduce investigación original, sino que se apoya en estudios publicados. Las investigaciones de toxicología animal, controladas en laboratorios, son más ordenadas que la confusa

JAMES PORTO (*fotografía del monitor*); JEN CHRISTIANSEN (*composición*); UNIVERSIDAD DE PITTSBURGH (*muestras tumorales*)

INTERPRETACION DE LOS DATOS



Con el consentimiento de los trabajadores afectados o de sus familias, los investigadores obtuvieron muestras de tumores y, en ciertos casos, de tejidos normales, para buscar señales de posibles daños causados por los carcinógenos en el ADN (*izquierda*). Esperan averiguar, cuando combinen estos resultados con informaciones sobre las sustancias a que estuvieron expuestos los empleados y el momento en que lo estuvieron (*derecha*), si las exposiciones durante el trabajo han contribuido al desarrollo de cánceres.

PISTAS GENETICAS

Los cambios, o mutaciones, en el ADN extraído de tejidos tumorales como los que presenta la pantalla del ordenador pueden sugerir posibles causas del tumor.

- Un perfil distintivo de las mutaciones en tumores de diferentes trabajadores podría sugerir, por ejemplo, una causa común.
- Estos análisis pueden también determinar la duración de los cambios acumulativos e incluso el orden en que los cambios se produjeron; así podría conocerse el momento inicial del desarrollo del cáncer.
- Ciertos carcinógenos conocidos deterioran el ADN de manera específica, dejando una huella de la exposición en las células tumorales e incluso en los tejidos normales.
- Las mutaciones de genes de las enzimas que metabolizan carcinógenos constituyen otra categoría de cambios promotores de cáncer que cabe detectar en tejidos no cancerosos; podrían servir para explicar cómo se inició un tumor.

VISUALIZACION DE LAS EXPOSICIONES

Para manejar el enorme volumen de datos recopilados acerca de las operaciones fabriles entre 1952 y 2001, se creó un "sistema de información geográfica". La base de datos permite extraer y conectar datos relativos a la localización de empleados, piezas y procesos —y a partir de ahí, las exposiciones de los trabajadores a posibles agentes tóxicos— en diferentes momentos del período en estudio.

epidemiología de personas reales expuestas a sustancias diversas en cantidades y combinaciones desconocidas, tanto dentro como fuera del trabajo.

Pero los transparentes ensayos sobre animales adolecen también de un fallo: sólo miden el efecto de un agente químico cada vez, mientras que los entornos fabriles suelen contener múltiples tóxicos. "Los datos humanos siempre son preferibles a la toxicología", afirma Gordon, profesor e investigador de medicina ambiental en la Universidad de Nueva York. "Sin embargo, a menudo no aportan datos suficientes sobre las exposiciones, y esa información carece de relación con la salud".

Los investigadores de Pratt & Whitney se esfuerzan por no caer en tales trampas, aunque reconocen algunos de los factores que, según Mash, "enmarañan" el estudio. Por ser incompleta la información de Bornemann sobre registros de cánceres en el estado, probablemente habrá casos de cáncer cerebral que le pasen inadvertidos. De los que ha localizado, sólo un 41 por ciento se ha prestado a participar; con miras a la validez científica, Marsh desea que haya al menos un 60 por ciento. Señala, además, que la recopilación de datos relativos a la historia clínica y género de vida de los participantes es razonablemente buena en un plano general, pero se descompone en cuanto se entra en detalles. La reconstrucción de exposiciones efectuada por el grupo de Chicago, pese a ser exhaustiva, no deja de ser una estimación de algo que sucedió hace decenios en plantas de taller que desde entonces se han cerrado o sufrido una radical limpieza.

Inicio del buen camino

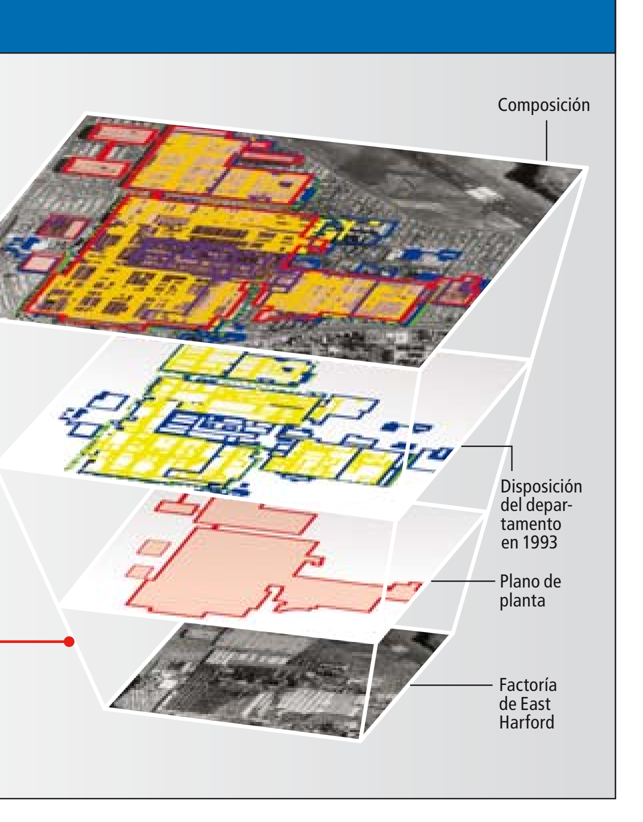
Transcurridos siete años y gastados 12 millones de dólares, es bastante probable que el estudio de Pratt & Whitney, como tantas otras investigaciones sobre la salud en centros de trabajo, no llegue a conclusiones. Para explicarlo, se aducen las dificultades de la epidemiología. En todos los estudios de esta rama, lo más que puede hacerse es demostrar que entre las exposiciones y los efectos en la salud existe una relación, no una causalidad estricta. Es especialmente difícil detectar las causas de patologías como el cáncer, que suele manifestarse decenios después de sufrir una exposición perjudicial. Y quizá sea imposible encontrar un nivel de exposición a carcinógenos definitivamente seguro.

Numerosos científicos celebrarían disponer de 12 millones de dólares para estudios capaces de dar resultados más claros en tiempos más breves, pero si no, probablemente, los millones de Pratt & Whitney no se habrían invertido en investigar sobre la salud en lugares de trabajo. Aun cuando el estudio nunca proporcione respuestas concluyentes a todas las cuestiones planteadas, no cabe considerarlo un derroche de tiempo o de dinero.

Quienes ahora se unen al proyecto esperan poder dar algún tipo de respuestas a las familias de Pratt & Whitney. "He trabajado en esto desde el primer día", dice Buchanich. "Por fin podremos decir algo a estos trabajadores, después de tanto tiempo".

Sean cuales fueren sus resultados concretos, el proyecto también podría decirnos algo a los demás. Las montañas de datos nuevos generados ayudarán a desentrañar las complejidades de la exposición a múltiples agentes tóxicos y a entender mejor, según Liebermann, la biología básica de la génesis de los tumores cerebrales. Y no sólo eso: el inaudito alcance del estudio estimula nuevas técnicas para manejar la enorme cantidad de información. El grupo de Chicago, por ejemplo, está creando una base de datos de información geográfica que permitirá a sus miembros cartografiar las operaciones fabriles en el tiempo y el espacio. Según Esmen, esa técnica podría aplicarse en cualquier estudio donde importen las relaciones espaciales, como la arqueología o la ingeniería industrial.

Esta incursión arqueológica en el pasado industrial de Connecticut quizá nos aporte instrumentos e información que en el futuro sirvan de ayuda a los trabajadores y a los pacientes de cáncer cerebral. Reducir las barreras que no sean científicas exigirá un diferente arsenal de instrumentos.



DEPARTAMENTO DE PROTECCION MEDIOAMBIENTAL DE CONNECTICUT (*capa inferior*); UNIVERSIDAD DE ILLINOIS EN CHICAGO (*capas intermedias*)

Bibliografía complementaria

WORKERS AT RISK: THE FAILED PROMISE OF THE OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. Thomas O. McGarity y Sidney A. Shapiro. Praeger Publishers, 1993.

OCCUPATIONAL AND ENVIRONMENTAL HEALTH: RECOGNIZING AND PREVENTING WORK-REATED DISEASE AND INJURY. Preparado por Barry S. Levy, David H. Wegman, Sherry L. Baron y Rosemary K. Sokas. Quinta edición. Lippincott Willliams & Wilkins, 2005.

DOUBT IS THEIR PRODUCT: HOW INDUSTRY'S ASSAULT ON SCIENCE THREATENS YOUR HEALTH. David Michaels. Oxford University Press, 2008.

GETTING HOME SAFE AND SOUND: OSHA AT 38. Michael Silverstein en *American Journal of Public Health* (*en prensa*).

CANCER CLUSTER FACT SHEET (Lista de conglomerados de cáncer) del Instituto Nacional del Cáncer: www.cancer.gov/cancertopics/factsheet/Risk/clusters



El atún rojo en peligro

¿Habrá que domesticar la especie para salvar al atún rojo, uno de los peces más maravillosos y amenazados del océano?

Richard Ellis

CONCEPTOS BASICOS

- La popularidad creciente del *sushi* y el *sashimi* ha devastado el atún rojo. La sobrepesca ha diezmado las poblaciones de los océanos Atlántico, Pacífico e Indico, empujando a la especie hacia la extinción. Los entes reguladores han establecido cuotas de captura poco estrictas; la pesca ilegal va en aumento.
- La cría en cautividad del atún rojo salvaría a la especie, pero la empresa plantea todo un desafío. En Japón y Europa han conseguido criar el atún en el laboratorio; una compañía australiana lo intenta a escala comercial.

No todos los atunes que consumimos pertenecen a la misma especie. El atún enlatado que comemos en bocadillos y ensaladas procede del listado o bonito listado (*Katsuwonus pelamis*), de un metro de longitud y que se captura en cantidades desmesuradas en todo el mundo, o del atún blanco, bonito del norte o albacora (*Thunnus alalunga*), otro pez de tamaño reducido que se comercializa con la denominación de "atún claro". El atún de aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y el patudo o atún de ojo grande (*Thunnus obesus*) son especies de mayor tamaño que también sufren sobrepesca; dado que ninguna de ellas produce un *sushi* de gran calidad, suelen servirse asadas.

El atún rojo, en cambio, un gigante entre los peces, es el pescado de elección para la elaboración de *sushi* y *sashimi* (platos de pescado crudo). Se ha convertido en el pescado de consumo más deseable del mundo. En cuanto tal, ocupa el primer lugar de otra lista más insidiosa: es probablemente la más amenazada de todas las especies de peces de gran tamaño. La sobrepesca ciega está empujando al atún rojo hacia la extinción; podría desaparecer en breve de no mediar una forma de criarlo en cautividad.

El peso máximo del atún rojo ronda los tres cuartos de tonelada. Con sus cuatro metros de longitud, parece una masa de músculo supercalentado que hiende el agua al mover

CHRIS PARK *AP Photo*

DATOS DEL ATUN ROJO

El atún rojo es un devorador insaciable. Está magníficamente adaptado para cazar en las frías aguas de los océanos templados.

Tamaño: El mayor atún rojo conocido se capturó en aguas de Nueva Escocia en 1979; pesaba **679 kilogramos**. Un adulto suele pesar la mitad y mide **dos metros** de longitud.

Velocidad: Un atún rojo nada a una velocidad de hasta **80 kilómetros por hora** en cortos arrebatos; atraviesa el océano Atlántico en menos de 60 días.

Reproducción: Las hembras producen hasta **10 millones de huevos por año**. Los peces que salen del huevo (larvas) tienen tres milímetros de longitud y crecen un milímetro cada día.

Duración de la vida: Las larvas de atún tienen sólo una probabilidad entre 40 millones de alcanzar la edad adulta; el adulto vive hasta **30 años**.

Precio: En 2001, un atún rojo de 200 kilogramos se compró en un mercado japonés por **113.000 euros** (unos 565 euros el kilogramo).

presto su cola en cimitarra. Mientras que la mayoría de las 20.000 especies de peces son de sangre fría (su temperatura corporal es la misma que la del agua del entorno), el atún rojo es uno de los pocos peces de sangre caliente. Sumergido a un kilómetro de profundidad, donde la temperatura del agua es de cinco grados Celsius, el atún rojo mantiene una temperatura corporal de 27 grados C, cercana a la de un mamífero.

El atún rojo, uno de los peces más céleres, alcanza velocidades de hasta 80 kilómetros por hora y migra a través de océanos enteros. Es tan buen nadador, que cuando en el decenio de 1990 los científicos se propusieron construir un pez mecánico, lo tomaron por modelo. Y así crearon un robot con un cuerpo ahusado, en forma de proyectil, y una aleta caudal rígida en luna menguante [*véase* "Robots de natación autónoma", de Michael S. Triantafyllou y George S. Triantafyllou; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1995]. Descubrieron que la eficacia de la cola residía en la interacción de los vórtices creados por su rápida flexión, pero la hidrodinámica de sus modelos electrónicos no se acercó siquiera a la de un atún rojo real.

Lo mismo que los lobos, los atunes rojos suelen cazar en manadas; forman una parábola que nada a gran velocidad y concentra las presas, lo que facilita el abatimiento de los cazadores sobre ellas. Los atunes poseen un metabolismo adaptado a las persecuciones veloces; al alimentarse de manera oportunista —y, por necesidad, compulsiva—, comen cuanto se les pone al alcance, ya se trate de una caballa fugaz, una platija del fondo marino o una esponja sedentaria. Un estudio del contenido estomacal de los atunes rojos de Nueva Inglaterra, realizado por Bradford Chase, de la División de Pesquerías Marinas de Massachusetts, reveló que el alimento dominante (en peso) era el arenque atlántico; le seguían el aguacioso, el tímalo y varios calamares. (Otras presas incluían pampanitos, merluzas americanas, rombos americanos, platijas de invierno, menhadens, caballitos de mar, bacalaos, sollas, eglefinos, peces lima, mediopicos, charrascos, mielgas, rayas, pulpos, camarones, langostas, cangrejos, salpas y esponjas.) Los atunes comen todo lo que capturan y capturan casi todo lo que nada, flota, se arrastra o simplemente se halla sobre el fondo. Cazan, de manera general, mediante la visión.

De bonito a *sushi*

El atún rojo no siempre se ha tenido por una exquisitez. En los primeros años del siglo XX, su carne roja y de sabor fuerte se consideraba en muchas partes del mundo comida apta sólo para perros y gatos. Con todo, en Nueva Jersey y Nueva Escocia la pesca deportiva veía en ese pez poderoso un contrincante digno. Zane Grey, el popular autor de *Los jinetes de la pradera roja* y otras novelas del Oeste, invirtió muchos de sus nada baladíes derechos de autor (vendió más de 13 millones de ejemplares de sus libros) en aparejos de pesca, barcos y viajes a localidades exóticas en busca de atunes, peces espada y marlines. Aunque el pez espada sí se consideraba comestible, se pensaba en atunes y marlines estrictamente como objetivos de la caza.

El atún rojo se apreciaba en ciertas localidades y regiones (por ejemplo, en el Mediterráneo), pero no se consumió y valoró de forma generalizada hasta la segunda mitad del siglo XX, cuando empezó a internacionalizarse el *sushi*.

Alguien podría pensar que el *sushi* y el *sashimi* han constituido elementos principales de la dieta japonesa durante siglos. No hubo tal. El consumo generalizado de pescado crudo es un fenómeno reciente. Dependientes del mar para obtener la mayor parte de su proteína, los japoneses no podían almacenar el pescado durante mucho tiempo sin que se estropeara; por ese motivo lo conservaban ahumado o en adobo. Cuando se introdujeron en el Japón de la posguerra los frigoríficos, el pescado que antes se ahumaba o se encurtía pasó a conservarse de forma casi indefinida. Al tiempo que la industria pesquera adoptaba nuevas técnicas, como el palangre (sedales extremadamente largos con numerosos anzuelos cebados), las redes de cerco (grandes redes que encierran todo un cardumen) y los barcos frigoríficos, las circunstancias favorecieron una modificación sin precedentes de los hábitos alimentarios de los japoneses.

El atún rojo pasó de ser un pescado rechazado por los samuráis, que lo tenían por impuro, a considerarse *maguro*, una exquisitez tan cara como las trufas o el caviar. El *toro*, el *maguro* de mejor calidad, procede de la carne ventral grasa del atún rojo adulto. Las trufas o el caviar son escasos —de ahí su elevado precio—, pero el atún rojo, hasta entonces rechazado, se encontraba en ingentes cardúmenes en alta mar; pronto se convirtió en un manjar exaltado a escala internacional. En 2001, un ejemplar de atún rojo se vendió en la lonja de pescado de Tsukiji, en Tokio, por 113.000 euros (en yenes). En los EE.UU. —donde 40 años atrás el mero hecho de pen-

LUCY READING-IKKANDA





▲ **1. LA SOBREPESCA del atún rojo es particularmente intensa en el Mediterráneo. En el sur de España, un grupo de pescadores de atún cobra una almadraba llena de atunes rojos (*arriba*) y llevan las pilas de peces gigantes hacia la costa (*derecha*).**

sar en comer pescado crudo era anatema—, el *sushi* y el *sashimi* constituyen hoy un producto común; se hallan en supermercados, tiendas de alimentos selectos y en la carta de numerosos restaurantes.

Un pez que se vende por cientos de euros la rodaja despierta el interés de las flotas pesqueras. La carrera tumultuosa para proporcionar atún a los mercados japoneses de *sushi* y *sashimi* ha intensificado la pesca del atún en todo el mundo. Los japoneses intentaron llenar sus despensas (y frigoríficos y lonjas de pescado) con los atunes que pescaban frente a sus costas (atún rojo del Pacífico, *Thunnus orientalis*), pero pronto se percataron de que en el Atlántico Norte los atunes rojos eran de mayor tamaño y abundaban más. Los compradores para importadores japoneses de pescado se convirtieron en una presencia habitual en los muelles de puertos norteamericanos como Gloucester y Barnstable, en Massachusetts; comprobaban el contenido graso de los atunes y, si éste era aceptable, compraban allí mismo el pescado y lo enviaban al Japón.

Antaño se creía que había dos poblaciones separadas de atún rojo del Atlántico Norte (*Thunnus thynnus*): una que se reproducía en el golfo de México y permanecía en el Atlántico occidental, y otra que frezaba en el Mediterráneo y se alimentaba en la parte oriental del océano. La Comisión Internacional para la Conservación de los Atunes del Atlántico (ICCAT), un ente regulador establecido en 1969, basaba sus cuotas de captura para el atún rojo en esa hipótesis. Establecía, pues, límites estrictos en el Atlántico occidental (donde el atún rojo escaseaba ya en el decenio de 1970) y permitía capturas mayores en el Atlántico oriental. Sin embargo, experimentos de marcaje y recaptura (que en los años cincuenta y sesenta iniciaron Frank J. Mather y Francis G. Carey, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, y que en fechas recientes ha refinado Barbara A. Block, de la Estación Marina Hopkins de la Universidad de Stanford) han demostrado que el atún rojo no sigue tal división. Los atunes rojos del Atlántico Norte se reproducen en el golfo de México y el Mediterráneo, para migrar luego a través del océano, y así las áreas de alimentación de las dos poblaciones se superponen. Dado que la ICCAT no ha logrado detener la sobrepesca en el Atlántico oriental, las poblaciones de atún rojo se han desplomado.

La situación es más alarmante todavía en el Mediterráneo. Mediante la aplicación de técnicas desarrolladas en Australia del Sur (con el atún rojo austral, *Thunnus maccoyii*), los pescadores acorralan cardúmenes de atunes jóvenes y los arrastran en corrales flotantes hasta ranchos marinos, donde se alimentan y ceban hasta que pueden sacrificarse y enviarse al Japón. Existen normativas que prohíben la pesca en el Mediterráneo de atunes de tamaño inferior al establecido, pero no hay ninguna que impida capturar atunes inmaduros y engordarlos en piscifactorías. Todos los países del Mediterráneo, excepto Israel, se aprovechan de ello y mantienen "ranchos" de atunes en aguas de la plataforma continental. En España, Francia, Italia, Grecia, Turquía, Chipre, Croacia, Egipto, Libia, Túnez, Argelia, Marruecos y


NEIL LUCAS *Nature Picture Library*

El autor

Richard Ellis es uno de los principales conservacionistas marinos de EE.UU. y un reconocido ilustrador de temas de historia natural marina. Sus pinturas de cetáceos han aparecido en *Audubon, National Wildlife, Australian Geographic, Encyclopedia Britannica* y otras publicaciones. Ellis es investigador asociado del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York y comisario adjunto de la exposición "Animales míticos".



▲ **2. COMPRADORES DE PESCADO inspeccionan los cadáveres de atún rojo en la lonja de Tsukiji, en Tokio. En este mercado de pescado se registró una compra récord: en 2001 se vendió un ejemplar de atún rojo por 20,2 millones de yenes, unos 113.000 euros.**

HISTORIA DEL *SUSHI*

La acuciante demanda de *sashimi* (lonchas de pescado crudo) y *sushi* (arroz rematado o enrollado con pescado o verduras) constituye la principal amenaza para el atún rojo.

Siglo IV a. de C. El *sushi* se originó en el sudeste asiático como un método de conservación del pescado. La fermentación del arroz impide que el pescado se pudra. El plato llega a Japón en el siglo VIII d. C.

Siglo XIX. El *sushi nigiri* (con pescado crudo y no conservado) es popular en los puestos del mercado de Edo, hoy Tokio. El pescado crudo no se convierte en un ingrediente común hasta la adopción generalizada del frigorífico, después de la segunda guerra mundial.

De los años setenta hasta hoy. El consumo de *sushi* se dispara en los EE.UU., pero el atún rojo se sirve sólo en restaurantes de categoría. La mayor parte del *sushi* que se consume en los EE.UU. procede de otras especies (atún de aleta amarilla y patudo) que también se hallan amenazadas. La inmensa mayoría del atún rojo se sigue consumiendo en Japón.

Malta se capturan cientos de miles de atunes inmaduros.

Si nos propusiéramos aniquilar una población reproductora, bastaría con capturar a los peces antes de que llegaran a la edad de reproducción y mantenerlos en rediles hasta que fueran sacrificados. Por tanto, los ranchos de atunes, que en un determinado momento se propusieron como una solución al problema de la extinción, no hacen más que agravarlo. En 2006, el Fondo Mundial para la Naturaleza realizó un llamamiento para acabar con la pesca de atunes en el Mediterráneo; sin embargo, dada la enorme rentabilidad del negocio, el lector puede imaginar el eco escaso de esa petición.

En su reunión de noviembre de 2007, la ICCAT ignoró los argumentos de los conservacionistas y estableció para el 2008 unas cuotas que apenas variaban respecto de las fijadas en el año anterior. La organización adoptó un plan para reducir en un 20 por ciento la pesca de atún en el Mediterráneo para el año 2010; el plan incluía también recortes ulteriores. Pero el presidente de la delegación de los EE.UU. censuró esa medida parcial, aduciendo que la ICCAT no había cumplido con la misión para la que se fundó.

Sin embargo, aunque se rebajaran las cuotas, el atún rojo seguiría estando en peligro. La pesquería atunera se halla repleta de flotas ilegales, que hacen caso omiso de cuotas, restricciones, fronteras y cualesquiera otras normas y regulaciones que puedan amenazar sus capturas. Además, el mercado japonés (que devora unas 60.000 toneladas anuales de atún rojo, más de las tres cuartas partes de la captura global) está dispuesto a comprar atunes, sin mirar dónde y cómo se hayan pescado. La flota pesquera nipona se las ha ingeniado para saltarse las restricciones de su propio país; cada año le llegan miles de toneladas de atunes ilegales de las que falsifica los registros.

Sería bueno para la especie y, en último término, para los consumidores, que la pesca de túnidos no se practicara de una forma tan implacable. Habría, empero, que modificar de raíz la naturaleza humana. Mientras las poblaciones de atunes continúan reduciéndose, crece la demanda japonesa de *toro*. Un número menor de atunes comportará una subida de precios, precios más altos producirán una intensificación de la pesca y la intensificación de la pesca supondrá, por supuesto, el desplome de la ya diezmada población de atunes. (La situación mejoraría si los japoneses relajaran su demanda de *maguro*, algo poco probable.) Parece que la única esperanza para el atún rojo reside en la cría en cautividad.

Ganado marino

En el artículo "When will we tame the oceans?" (¿Cuándo domesticaremos los océanos?), publicado en *Nature* en 2005, John Marra, del Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, anunciaba que la pesca en el mar ya no es sostenible. En su opinión, hemos fracasado en la gestión de las pesquerías oceánicas, que podrían agotarse en pocos decenios. ¿Su recomendación? Una

CORTESIA DE RICHARD ELLIS (*lonja de pescado*); DEX IMAGE/CORBIS (*sashimi*)

PASADO Y PRESENTE DEL ATUN ROJO

El atún rojo (*Thunnus thynnus*) se ha capturado durante milenios en las cercanías del estrecho de Gibraltar y toda la cuenca mediterránea. La ciudad de Baelo Claudia, cuyas ruinas se encuentran en la provincia de Cádiz, revela la importancia que tuvo esa especie en el mundo latino. La pesca, la industria de la salazón y del *garum* (salsa de sabor intenso hecha con restos de atún rojo y otros peces macerados al sol en salmuera) constituían las principales fuentes de riqueza de esa ciudad.

El 18 de febrero de 1757, el padre benedictino Fray Martín de Sarmiento le comunicaba al Duque de Medina Sidonia, entonces propietario de las almadrabas del sur de España: "*Esta dicha observación de que he sido testigo, excitó la curiosidad del Excelentísimo Señor Duque, al compararla con la escasez de los Atunes que hoy concurren a sus Almadrabas; siendo constante que en los siglos pasados, eran casi infinitos los Atunes que en las Almadrabas se cogían*". Estudios recientes, basados en las capturas de las almadrabas desde el siglo XVI hasta el presente, han demostrado que la población de esa especie presenta ciclos de máximos y mínimos con intervalos de entre 100 y 120 años. Ello indica que la pesca del atún sufría fluctuaciones notables, con épocas de gran escasez.

Teniendo en cuenta que el atún rojo es una especie migratoria y que existe una fuerte interacción entre las pesquerías a uno y otro lado del océano Atlántico, cabe recordar un acontecimiento que vino a modificar el estado general de este recurso: el gran desarrollo de las pesquerías que tuvo lugar en el Atlántico después de la segunda guerra mundial. A finales de los años cuarenta del siglo pasado, se construyeron flotillas de cerqueros en el norte de Europa; se dedicaban a la pesca de especies pelágicas (arenque y caballa), pero durante el verano cambiaban sus redes para la captura del atún rojo. Ello coincidió con el inicio de la pesca japonesa con palangre en todo el océano, el desarrollo de la pesca del atún con cebo vivo en el golfo de Vizcaya y con red de cerco en el Atlántico occidental (Massachusetts).

Tras un inicio espectacular, el esplendor de las pesquerías del norte de Europa duró apenas doce años. Desde 1963, las capturas se desplomaron y ya no se han recuperado. Lo mismo ocurrió con las almadrabas del estrecho de Gibraltar y poco después con las pesquerías de grandes ejemplares del golfo de Vizcaya y todas las del Atlántico occidental.

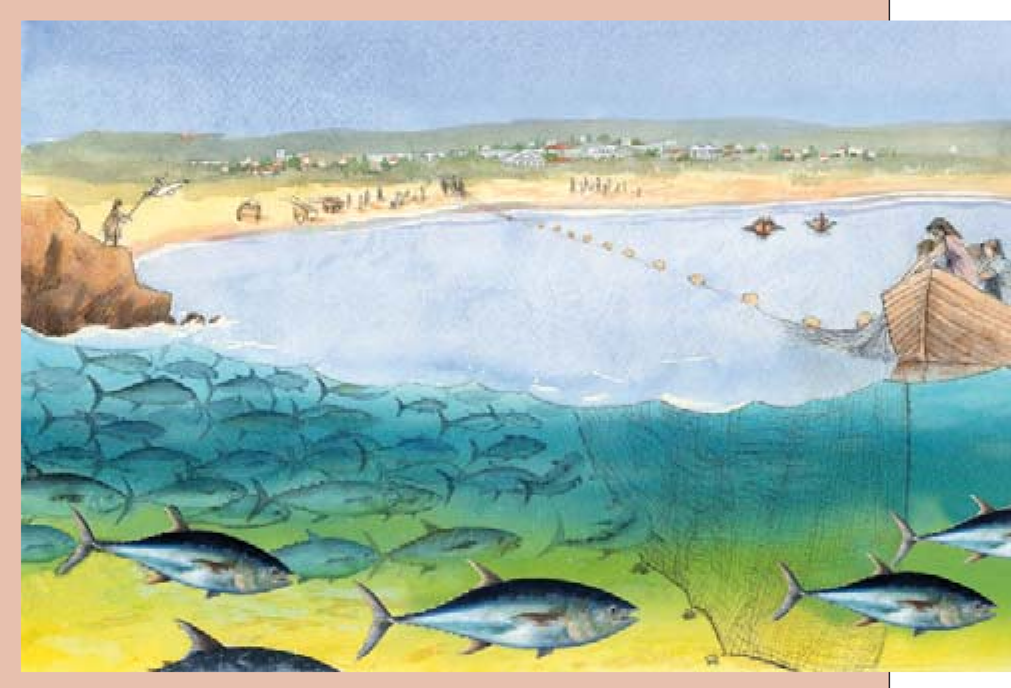
Al propio tiempo, durante el decenio de los setenta, se desarrollaba en el Mediterráneo la pesca con red de cerco. La evolución de ese sistema de pesca ha sido constante desde entonces. A partir de 1996 —año en que se alcanzaron cifras récord de captura—, la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT) asignó a los países pesqueros un sistema de cuotas. Según las cifras oficiales, desde ese año se ha producido un descenso de las capturas en el Atlántico oriental y Mediterráneo. Pero la realidad es otra. El gran desarrollo de la pesca actual, dirigida a la captura en el Mediterráneo de peces reproductores, cuyo destino son las granjas de engorde para abastecer los mercados asiáticos de consumo en crudo (Japón, sobre todo), ha provocado un incremento de la pesca ilegal. En la actualidad, la pesca del atún rojo supera con creces los niveles que recomienda la ICCAT para garantizar la sostenibilidad del recurso.

La sobreexplotación de las pesquerías atlánticas ha conducido al colapso de algunas de ellas. ¿Seguirán las pesquerías mediterráneas el mismo camino? Todo parece indicar que la cuenta atrás ya ha comenzado. El proceso empieza con un incremento del esfuerzo de pesca en las áreas de gran productividad; ello ha ocurrido en el mar de Baleares, mar Tirreno, golfo de Sidra y mar de Levante. Le sigue una fase de descenso de los rendimientos pesqueros; un síntoma detectado ya en algunas de esas áreas. Por fin, sobreviene el colapso de las pesquerías.

La situación actual del atún rojo ha movilizado la opinión pública y la comunidad científica internacional; exigen que se empleen todos los medios para proteger a tan amenazado recurso natural. A finales de los años noventa, diez instituciones científicas europeas iniciaron una colaboración que se propone culminar con el mayor reto de la acuicultura marina: la domesticación del atún rojo. El grupo se denomina DOTT ("Domestication of Thunnus thynnus"). En una investigación llevada a cabo entre 2003 y 2006 (proyecto REPRODOTT), se logró la puesta en cautividad del atún rojo del océano Atlántico. El grupo afronta ahora un gran proyecto de tres años de duración (2008-2010), con un presupuesto de cuatro millones de euros y bajo la coordinación de Fernando de la Gándara, del Instituto Español de Oceanografía de Murcia. Se proponen reafirmar el conocimiento actual sobre la reproducción en cautividad de esta especie, establecer los conocimientos básicos necesarios para la obtención de puestas y el control del desarrollo larvario, y constituir las bases para el desarrollo de alimentos que respeten el medio.

El reto es enorme. Pero, si se supera, tendrá efectos muy positivos en la conservación de la especie. Los científicos japoneses lo intentaron con el atún rojo del océano Pacífico; lo lograron en 2004, después de treinta y dos años de investigación.

José L. Cort
Centro Oceanográfico de Santander
Instituto Español de Oceanografía



Pesca del atún rojo en la ciudad de Baelo Claudia, en el estrecho de Gibraltar, 200 a. C.

domesticación a gran escala del océano, con granjas de peces que críen, engorden y recolecten especies de interés comercial. Marra reconocía que las piscifactorías actuales han causado daños ambientales: han contaminado los ecosistemas costeros y han añadido presión a las poblaciones de peces silvestres, al propagar enfermedades y productos tóxicos. La solución que propone se basa en el traslado mar adentro de esas operaciones de maricultura, que se llevarían a las aguas de las plataformas continentales externas; se instalarían corrales para peces de mayor tamaño, unas estructuras cerradas mediante redes que abarcarían hasta 100.000 metros cúbicos de agua, flotarían bajo la superficie y se remolcarían de una localidad a otra. Se dispersarían así los contaminantes generados por la piscicultura, lo que mitigaría el daño ambiental.

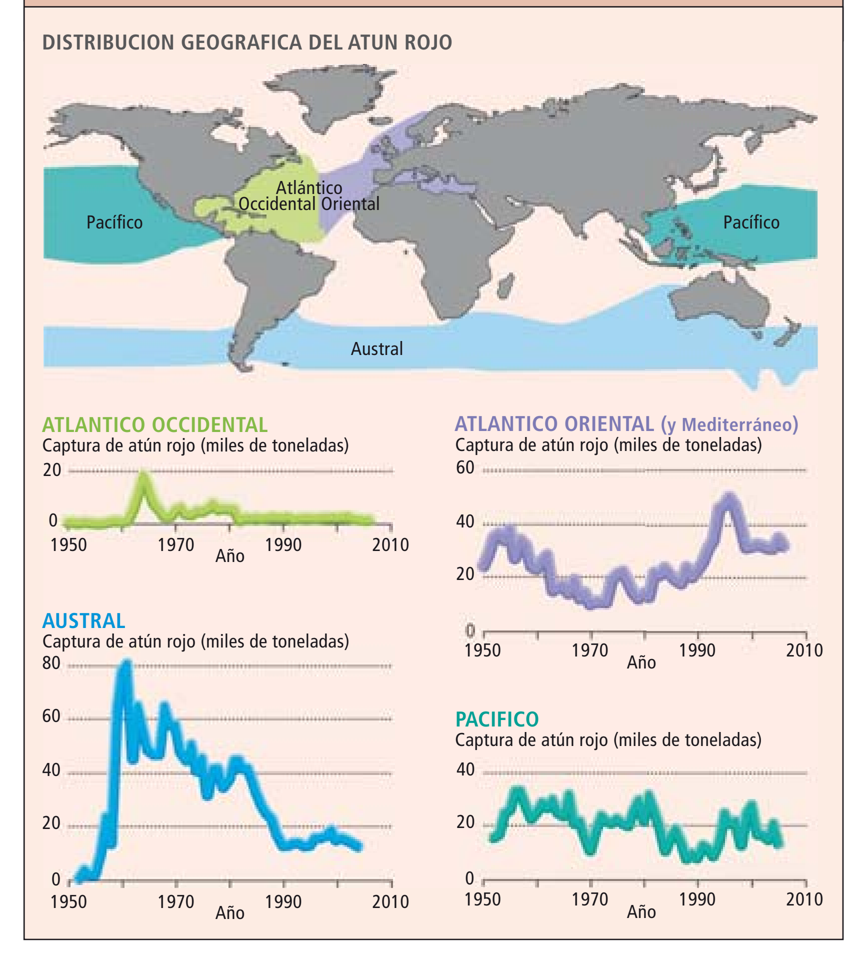
Marra sugería una estrategia adicional: sacar partido de la tendencia que muestran ciertas especies de atún para agregarse bajo un objeto distinto de su entorno. Esa idea ya se ha aplicado en el diseño de dispositivos de pesca basados en la agregación de peces, que se remolcan con barcas para atraer a los cardúmenes de atunes. No se capturarían de golpe todos los peces, sino que se llevaría a cabo una gestión sostenible mediante la alimentación, el mantenimiento y la recolección periódica de algunos de los atunes del cardumen, una gestión semejante a la de los rebaños de ganado.

A menos que se críen los atunes como si de animales domésticos se tratara, su población mundial continuará desplomándose. Pero la cría de atunes en cautividad supone un gran reto. Clean Seas Aquaculture Growout, una empresa del Grupo Stehr, en Port Lincoln, Australia del Sur, se ha propuesto superarlo. El gobierno australiano ha concedido a Clean Seas una subvención de 4,1 millones de dólares australianos (2,3 millones de euros) para promover la comercialización de la cría del atún rojo austral. La compañía ha criado en cautividad peces de limón listados (*Seriola lalandi*) y corvinas del sur (*Argyrosomus hololepidotus*). Ya se producen a escala comercial. En octubre de 2006, Clean Seas transfirió atunes rojos en edad reproductora (machos y hembras sexualmente maduros) de sus corrales a un tanque de tres millones de litros que remedaba las condiciones óptimas para la freza. Un ordenador central modifica la iluminación del tanque, simula la salida del sol, la puesta, etcétera. Se trata de un sistema novedoso y único en el mundo.

Durante mi visita a Port Lincoln en febrero de 2007, Rob Staunton, el gerente de la granja para el Grupo Stehr, me llevó hasta Arno Bay, a 120 kilómetros al norte de Port Lincoln, en la costa occidental del golfo de Spencer. Me permitieron la entrada (reservada) en el santuario del negocio del atún, el gigantesco tanque cerrado de atunes del vivero de Arno Bay. Digo "reservada" porque mi visita, autorizada personalmente por el mismo Hagen Stehr, fundador de la compañía, estuvo condicionada por notables restricciones, comprensibles. No se permite tomar fotografías en las instalaciones, porque las técnicas, el procesamiento del agua, el control del clima y todos y cada uno de los demás elementos del diseño de este proyecto han de salvaguardarse cuidadosamente para evitar el espionaje industrial.

DEPREDACION A ESCALA MUNDIAL

Las flotas pesqueras de todo el mundo han extraído miles de toneladas de atún rojo de los océanos y ahora la especie se ve abocada a la extinción. Parece que la situación es peor en el Atlántico Occidental. A pesar de que la Comisión Internacional para la Conservación de los Atunes del Atlántico (ICCAT) ha impuesto, desde 1981, cuotas de captura estrictas en el Atlántico Occidental, se estima que la cantidad de peces sexualmente maduros en esa región (medida a partir de su masa total) es inferior al 20 por ciento de la que era a mediados de los años setenta. Parte del problema estriba en que los atunes rojos del Atlántico Occidental migran a la región oriental de dicho océano, donde las cuotas de captura son unas 10 veces mayores. Más aún, las cifras de las capturas de que se informa (*abajo*) no incluyen la pesca ilegal; se cree que la captura real de atún rojo en el Atlántico Oriental y el mar Mediterráneo dobla las cifras oficiales. Tendencias similares están reduciendo las poblaciones de atún rojo del Pacífico y de los atunes rojos australes, que frezan en el océano Indico.



LUCY READING-IKKANDA; FUENTE: DPTO. ACUICULTURA Y PESCA, FAO

Además de la subvención del gobierno australiano, el Grupo Stehr ha invertido millones en el diseño innovador de esas instalaciones; sería desastroso que alguien se apropiara de sus diseños o los modificara y con ello les ganara la partida. Resulta difícil imaginar que alguien pudiera copiar esa operación gigantesca sin que nadie en Australia se enterara; pero hay empresarios de otros países (Japón, por ejemplo) muy interesados en el negocio de la cría en cautividad del atún rojo. Un grupo de investigadores de la Universidad de Kinki ya ha hecho eclosionar atunes rojos a partir de huevos y los ha criado en el laboratorio hasta la edad reproductora.

Para empezar nuestro recorrido, Staunton y yo tuvimos que calzarnos unas botas de caucho blanco especiales, esterilizadas para impedir la introducción de microorganismos extraños en los tanques de alimentación de los atunes. Guiados por Thomas Marguritte, cambiamos nuestras botas blancas por otras azules cuando entramos en la estancia central del vivero de Arno Bay: el tanque de cría de atunes rojos. En una sala cavernosa iluminada por una batería de luces fluorescentes, con el sordo zumbido del aire acondicionado como único ruido de fondo (la temperatura en el exterior era de unos 38 grados C), subimos al borde de hormigón del tanque imponente y miramos hacia abajo.

El tanque tenía unos 25 metros de diámetro y seis metros de profundidad. La iluminación era tenue; apenas veíamos nada que resaltase. Marguritte lanzó entonces al agua un par de peces de tamaño reducido y, de repente, un relámpago azul ultramar y cromo rompió la superficie: uno de los atunes arremetió contra la carnada. El tanque bullía de espuma, atravesada por las aletas dorsales y caudales falciformes de los atunes, que anticipaban una comida (aunque habían sido alimentados hacía sólo una hora). Mientras nadaban agitadamente en círculos bajo nosotros, descubrimos que se trataba de ejemplares adultos. Especímenes de 300 kilogramos: una suerte de torpedo delgado y bruñido, ahusado en ambos extremos, con una línea de trazos de pínnulas o falsas aletas amarillas situadas inmediatamente antes de la cola, y los sorprendentes paréntesis que marcan las quillas horizontales de estas especies, amarillos cromo en el atún rojo austral y negros en las variedades septentrionales. Nadie es capaz de distinguir un macho de una hembra (vivos), excepto otro atún.

Inclinados sobre el borde del tanque, conversamos acerca del programa de reproducción. Marguritte afirma que podían remedar las condiciones exactas de las aguas de Indonesia, donde frezan en condiciones naturales. Si por







GAVIN NEWMAN *AFP/Getty Images* (*arriba*); CHRIS PARK *AP Photo* (*centro*); AFP/GETTY IMAGES (*abajo*)

▲ 3. JAULAS DE PECES, que aceleran la desaparición del atún rojo, se remolcan a través del Mediterráneo a ranchos marinos cerca de Sicilia (*arriba*). Cada jaula contiene unos 250 atunes rojos. Frente a la costa de Ensenada, en México, los criadores de atunes alimentan a cardúmenes de atunes rojos del Pacífico hasta que han adquirido el peso necesario para su venta (*centro*). Las rodajas de atún fresco se envían al aeropuerto internacional de Los Angeles, donde se embarcan en vuelos sin escala hacia Japón. En el interior de una jaula de atunes en el mar Adriático, en aguas croatas, un buceador nada entre los peces condenados antes de que, también ellos, sean enviados a Japón (*abajo*).



▲ **4. GREENPEACE organizó una protesta en una playa del sur de Turquía el noviembre de 2007, coincidiendo con la conferencia anual de la Comisión Internacional para la Conservación de los Atunes del Atlántico, que se celebraba en aquel país. El ente regulador ignoró las peticiones de un cese inmediato de la pesca del atún rojo en el Mediterráneo. Adoptó un plan que prevé reducciones modestas de las cuotas de captura en el transcurso de los próximos años.**

lo general frezan durante el verano del hemisferio austral, cuando los días son más largos y la temperatura del agua más elevada, pueden hacer que el tanque se ajuste a las condiciones de una fecha concreta (el 20 de noviembre, por ejemplo): establecen entonces la duración de las horas de luz de día, la temperatura del aire, la del agua e incluso las corrientes. Logran así reproducir dicho momento en el océano Indico, al sur del archipiélago Indonesio. La única variable que no pueden remedar es la profundidad del agua, y cruzan los dedos para que no constituya un factor crítico en la reproducción del atún rojo austral.

Inmediatamente al sur del arco de islas de Indonesia (Java, Bali, Flores, Sumba, Komodo, Timor) se halla la fosa de Java, que desciende hasta uno de los puntos más profundos del océano Indico, una caída de casi ocho kilómetros de profundidad. Si la profundidad constituye un factor clave, el proyecto de Clean Seas está sentenciado. La población reproductora de Clean Seas no produjo descendencia en 2007; este año lo intentarán de nuevo.

Domesticar el atún rojo

En la sala de conferencias de Clean Seas, en el centro de operaciones de Port Lincoln, conocí a Marcus Stehr, consejero delegado de la compañía. El día anterior, Marcus había estado a bordo de uno de los buques atuneros cerqueros en la Gran Ensenada Australiana (la enorme bahía abierta de la costa austral del continente), mientras una jaula de red que contenía unas 100 toneladas de atún empezaba su viaje hasta los corrales en aguas de Port Lincoln. Como todos los que guardan alguna relación con esta empresa, Marcus se muestra entusiasmado y optimista acerca del éxito del proyecto, que cree inminente. Está convencido de que su hazaña cambiará por completo la percepción del atún rojo en Australia.

Aunque los australianos parecen ir en cabeza, queda por ver si serán ellos, los japoneses o los europeos los que ganen la carrera para la cría en cautividad del atún rojo. En 2005, un grupo del Instituto Español de Oceanografía que trabaja en el puerto de Mazarrón extrajo óvulos y espermatozoides de una población reproductora cautiva de atún rojo del Atlántico; mediante fecundación *in vitro* obtuvieron larvas. (Los animales que salen del huevo en los peces óseos se denominan larvas porque su aspecto es muy distinto de su morfología adulta.) Debe conseguirse. La supervivencia de la especie —y de la industria atunera— dependen de ello.

Para el pescador deportivo, el atún rojo es una presa poderosa y atractiva. Para el arponero, una sombra iridiscente que agita bajo la superficie su cola falciforme y burla su alcance. El pescador de cerco ve un remolino turbulento de cuerpos plateados y azules que hay que izar a bordo. El palangrero, un pescado que se amontona en cubierta junto a muchos otros animales marinos brillantes. Para el criador de atunes, el atún rojo es un animal anónimo al que hay que cebar hasta que llegue el momento de hundir un estilete en su cerebro. El subastador de la lonja de pescado de Tsukiji ve un sinfín de hileras de bloques helados con forma de atún y sin cola. Para los consumidores japoneses es un *toro*, una tajada de carne deliciosa que se come con *wasabi* y salsa de soja.

Para el biólogo, el atún rojo constituye una maravilla de la ingeniería hidrodinámica, con un cuerpo repleto de modificaciones que hacen que coma más, crezca más, nade más, se sumerja más y migre más que cualquier otro pez marino. Y para los que desean rescatar a *Thunnus thynnus* del olvido biológico, debe ser visto como un animal doméstico, lo mismo que una oveja o una vaca.

Para algunos, se trata de un cambio imposible. El atún rojo, merodeador por excelencia de los océanos, el pez más salvaje y más poderoso del mar, no puede —y probablemente no *debería*— domesticarse. Pero si permanece salvaje, se le avecina un futuro sombrío... el mismo que a la industria del *maguro*.

GREENPEACE/HO *AP Photo*

Bibliografía complementaria

GIANT BLUEFIN. Douglas Whynott. North Point Press, 1995.

SONG FOR THE BLUE OCEAN. Carl Safina. Henry Holt, 1997.

RAPID WORLDWIDE DEPLETION OF PREDATORY FISH COMMUNITIES. Ransom A. Myers y Boris Worm en *Nature*, vol. 423, págs. 280-283; 15 de mayo, 2003.

DOLLARS WITHOUT SENSE: THE BAIT FOR BIG-MONEY TUNA RANCHING AROUND THE WORLD. John P. Volpe en *BioScience*, vol. 55, nº 4, págs. 301-302; abril 2005.

ELECTRONIC TAGGING AND POPULATION STRUCTURE OF ATLANTIC BLUEFIN TUNA. Barbara A. Block *et al.* en *Nature*, vol. 434, págs. 1121-1127; 28 de abril, 2005.

THE SUSHI ECONOMY. Sasha Issenberg. Gotham, 2007.

Antiparalelogramos, ruedas y émbolos

El cuadrilátero cuyos lados se cruzan hace rodar dos elipses, una sobre la otra, y transforma el movimiento rectilíneo del vaivén de un émbolo en el circular de una rueda

Norbert Treitz

Un cuadrilátero plano, en el que los pares de lados opuestos son iguales, no es necesariamente un paralelogramo. Puede ser un antiparalelogramo. En un artículo anterior (Investigación y Ciencia, Curiosidades de la física, febrero 2008) vimos que un paralelogramo dos de cuyos lados se cruzan, un antiparalelogramo, hace rodar dos elipses una sobre la otra y que, con un poco de esfuerzo mental, permite también explicar la propagación del sonido en una sala elíptica.

Abordamos ahora otra propiedad del antiparalelogramo, muy peculiar: la de convertir un movimiento circular en uno rectilíneo y viceversa. Es el viejo sueño de los constructores de las máquinas de vapor. Su inventor James Watt estaba orgulloso de haber encontrado una solución aproximada. Pafnuti Tschebyschow (1821-1894), al que los matemáticos suelen llamar Tschebyschew, teórico de los números y de la probabilidad, calculó muy buenas aproximaciones.

Que es posible convertir de manera exacta un movimiento circular en uno rectilíneo por medio de un varillaje lo descubrió en 1874 Harry Hart (1848-1920), de cuya vida apenas si se puede encontrar alguna información publicada. Los puntos medios de cada uno de los cuatro lados del antiparalelogramo están siempre en una misma recta. A lo largo de ésta, se cumple una relación geométrica: el producto de la longitud de dos segmentos sobre una recta que comparten un mismo extremo es constante bajo una operación de “inversión respecto a un círculo”. La inversión respecto del círculo transforma rectas en circunferencias, y al revés. El general francés Charles-Nicolas Peaucellier (1832-1913) encontró un inversor exacto, que funcionaba con una combinación de un trapezoide simétrico y un rombo (*véase la figura 1*).

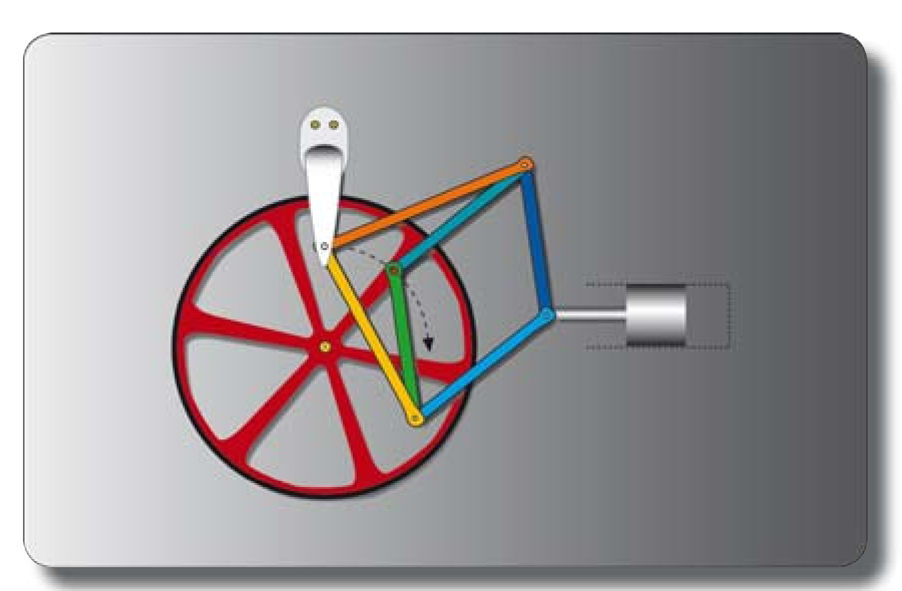
La ventaja técnica de una conversión exacta en movimiento rectilíneo resulta de todas maneras limitada. Claro está que para que el émbolo del cilindro no se tuerza no hay que tener que recurrir a medidas especiales. Las diversas articulaciones giratorias deberán conservar su movilidad gracias a la lubricación, lo que no tiene por qué suponer menos trabajo.

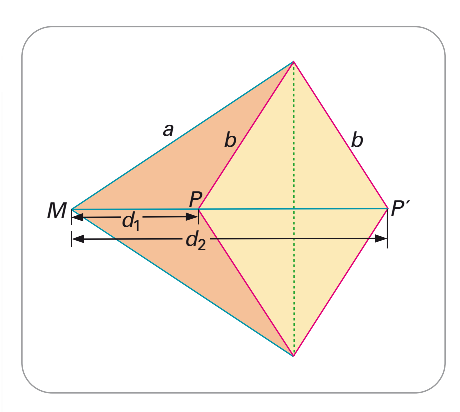
Supongamos ahora que se fija uno de los lados del cuadrilátero deformable. Lo denominaremos puntal; a los que cuelgan de él, brazos, y biela al lado opuesto al puntal. Si ningún lado es más largo que los otros tres juntos, se tiene un cuadrilátero. Si debe permanecer en un plano, tendrá un grado de libertad, un ángulo que puede ir tomando cualquier valor. Según una regla de Franz Grashof (1826-1893), los ángulos en los extremos del lado más corto pueden girar del todo si los lados más corto y más largo juntos no son más largos que los otros dos. Dependiendo de si el lado más corto es el puntal, el brazo o la biela, habrá diferentes tipos de manivelas y cuadriláteros deformables.

Cuadriláteros deformables

En nuestro antiparalelogramo elijamos por puntal uno de los lados más largos. Entonces, los dos más cortos serán los brazos y el otro más largo la biela. Ahora la condición de Grashof se cumple de maneras diversas, sobre todo con el caso límite de que haya igualdad entre los dos pares de lados. Significa que el cuadrilátero deformable puede ir cambiando entre paralelogramo y antiparalelogramo.

Los puntos de los brazos trazan arcos de circunferencia. El movimiento de los puntos de la biela no tiene por qué ser





El inversor de Peaucellier: con el teorema de Pitágoras se deduce que el producto $\overline{MP} \cdot \overline{MP'}$ sólo depende de la longitud de las varillas *a* y *b*; es igual a $a^2 - b^2$. A la izquierda una posible realización.

SIGANIM/*Spektrum der Wissenschaft (todas las ilustraciones)*

tan trivial. Si el cuadrilátero se mueve como un paralelogramo, entonces cada punto de la biela se desplazará sobre un círculo cuyo radio será la longitud de los brazos. En cambio, en el movimiento como antiparalelogramo los puntos de la biela se desplazarán sobre curvas en forma de ocho; su punto medio lo hará sobre un ocho con dos ejes de simetría. En el caso en que el puntal y la biela sean más largos que los brazos en un factor $\sqrt{2}$ (para una caja de construcciones metálicas, 7/5 es una aproximación racional aceptable de $\sqrt{2}$), la curva que describe el punto medio de la biela es una lemniscata de Bernoulli.

Esta curva resulta de invertir una hipérbola rectangular respecto al círculo cuyo diámetro es el eje mayor de la hipérbola. Se trata de una curva de Cassini especial; esto es, un conjunto de puntos para los que el producto de las distancias a dos puntos dados es una constante. No se ha de confundir con la lemniscata de Gerono, que es una curva de Lissajous.

En la cercanía del centro, la lemniscata de Bernoulli se aproxima a una línea recta. Esta porción de la curva la utilizó James Watt de guía del émbolo en la máquina de vapor, si bien con una curva más esbelta y de brazos más pequeños.

Tales mecanismos ingeniosos no se encuentran en las máquinas de vapor modernas, ni tampoco en los motores de combustión interna. Se ha comprobado que es más acertado forzar el movimiento rectilíneo del pistón con otros medios y emplear mecanismos tan banales como bielas y crucetas para la transformación del movimiento rectilíneo en uno circular.

LA CONVERSION RECTILINEA EXACTA

La inversión respecto al círculo se denomina también “reflexión en el círculo”, aunque una circunferencia reflectante daría una imagen muy diferente. Una inversión reproduce el interior de un círculo en el exterior y viceversa; la circunferencia se reproduce sobre sí misma. El punto imagen *P′* de un punto *P* tras la inversión está, desde el punto de vista del centro *M* del círculo, en la misma dirección que *P* y de tal manera que el producto de las distancias de ambos puntos a *M* es igual al cuadrado del radio: $\overline{MP} \cdot \overline{MP'} = R^2$. En el plano de los números complejos, la imagen tras una inversión respecto del círculo particular de centro 0 y radio 1 resulta ser el conjugado del inverso.

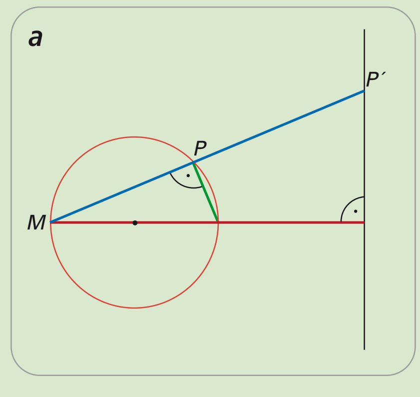
En tres dimensiones la inversión se puede extender de manera similar a la esfera.

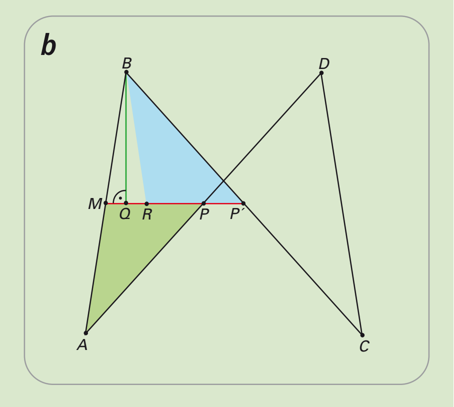
Una circunferencia que pase por el centro *M* del círculo de inversión se convierte, tras la inversión con respecto a ésta, en una recta: si *P* se desplaza sobre la circunferencia que pasa por *M*, su imagen inversa *P′* se desplazará sobre una recta perpendicular a la recta que pasa por los dos centros de los círculos (*triángulos semejantes en la figura a*).

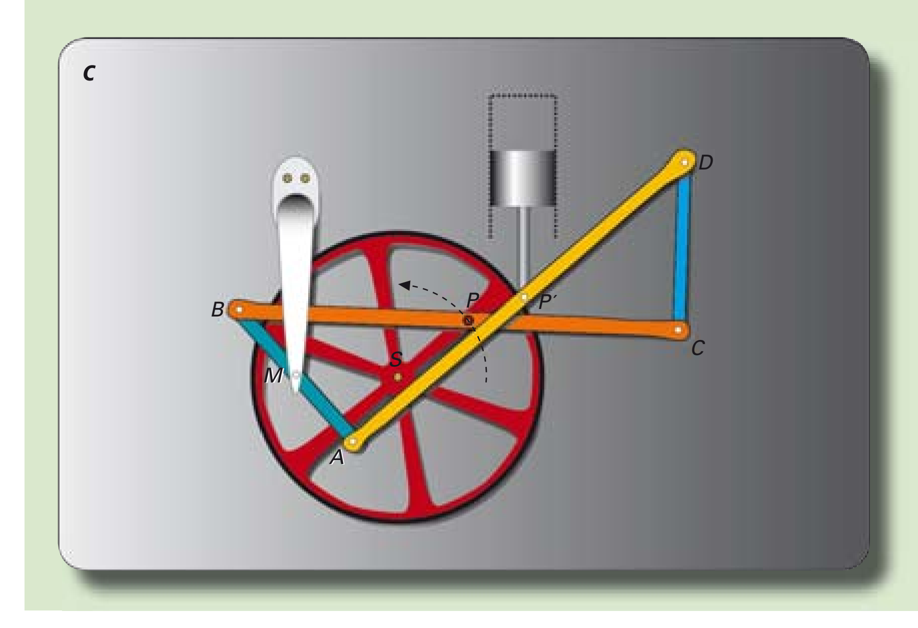
Esta situación se vuelve a dar en el antiparalelogramo *ABCD* (*véase b*): trazamos la mediana del trapecio *ABCD* correspondiente (cualquier otra paralela sería igual de útil). *M*, *P* y *P′* son los puntos medios de $\overline{AB}$, $\overline{DA}$ y $\overline{BC}$. Demostraremos que, para cualquier posición del antiparalelogramo, *P* y *P′* son la imagen uno del otro tras una inversión con respecto a una circunferencia centrada en *M*.

Sean *BQ* la perpendicular a *MP* desde *B*, y sea $\overline{QR}$ de la misma longitud que $\overline{MQ}$. Entonces los dos triángulos coloreados *APM* y *BRP′* son congruentes entre sí y $\overline{MP} = \overline{RP'}$, esto es, $\overline{MR} = \overline{PP'}$. Nos interesamos por $\overline{MP} \cdot \overline{MP'} = \overline{RP'} \cdot \overline{MP'} =$ $= \overline{RP'} \cdot (\overline{RP'} + 2 \cdot \overline{QR}) = (\overline{RP'} + \overline{QR})^2 - \overline{QR}^2 =$ $= \overline{QP'}^2 - \overline{MQ}^2$. Aplicando el teorema de Pitágoras a los triángulos *QRB* y *QP′B* vemos que el producto da $\overline{MP} \cdot \overline{MP'} =$ $= \overline{P'B}^2 - \overline{MB}^2$. Es decir: sólo depende de las longitudes de los lados del antiparalelogramo y no de los ángulos.

Como mecanismo articulado, sería realizable como en *c*. Los puntos *M* y *S* están fijados a la tabla, y *P* a un punto del perímetro de la rueda. Cuando *P* gira sobre una circunferencia alrededor de *S*, *P′* se desplaza por una recta perpendicular a *MS*: la rueda acciona el émbolo o viceversa.







Encuestas electorales

Entre lo que declaran los ciudadanos en las encuestas electorales y la estimación de voto que hacen las empresas demoscópicas hay grandes diferencias. ¿Cómo se obtiene la estimación del voto a partir de las respuestas obtenidas en las encuestas?

Juan M. R. Parrondo

Un par de semanas antes de las últimas elecciones generales del 9 de marzo, casi todos los periódicos publicaron en primera página los resultados del sondeo preelectoral realizado por el Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS) que auguraba un "empate técnico" entre los dos grandes partidos políticos, PSOE y PP, asignando al primero un 40,2 % de los votos válidos y al segundo un 38,7 %. Sin embargo, al leer el estudio con más detalle, se podía observar que a la pregunta "¿si las elecciones fueran mañana, a qué partido votaría usted?" un 31,0 % de los encuestados respondía PSOE, mientras que un 21,1 % se decantaba por el PP. Añadiendo a estos datos las simpatías mostradas por los aún indecisos, el PSOE alcanzaba un 37,1 % y el PP un 24,5 %. ¿Cómo es posible que una diferencia de casi 10 puntos en la intención de voto, o de más de 12 puntos en la intención de voto más la simpatía, se tradujeran finalmente en una de 1,3, es decir, en un "empate técnico" (bastante cercano a los resultados finales)?

En el mismo estudio del CIS, antes de dar paso al anexo que contiene la estimación de voto, se advierte: "*Dado que los datos de los indicadores 'intención de voto' e 'intención de voto + simpatía' son datos directos de opinión y no suponen ni proporcionan por sí mismos ninguna proyección de hipotéticos resultados electorales, en este anexo se recogen los resultados de aplicar un modelo de estimación a los datos directos de opinión proporcionados por la encuesta. Obviamente, la aplicación a los mismos datos de otros modelos podría dar lugar a estimaciones diferentes*."

¿Por qué la intención de voto no es una buena estimación del voto que se producirá en las elecciones? ¿Y cuál el modelo utilizado por el CIS para estimar el voto a partir de los datos de la encuesta? Aunque dicho modelo no se publica en la página *web* del CIS, el director de su departamento de investigación sí ha respondido amablemente a mis consultas y me ha proporcionado información acerca del procedimiento de estimación.

El problema principal con el que se enfrentan los técnicos del CIS es la gran, y constante, discrepancia entre el recuerdo de voto en las pasadas elecciones de 2004 y el voto real que se produjo en aquellos comicios. En la Tabla I se pueden ver las respuestas a la pregunta "¿a quién votó en las últimas elecciones generales (2004)?" junto con los porcentajes de voto que realmente tuvieron lugar. Es difícil explicar estas discrepancias, que además se producen en multitud de encuestas, no sólo en las de intención de voto. ¿Se deben a una elección incorrecta de la muestra o a que algunos encuestados no dicen la verdad?

Aunque es poco probable que sea así, lo más sencillo desde un punto de vista teórico es suponer que la discrepancia se debe a un error muestral. Esta suposición permite corregir los datos de cualquier pregunta realizada en la encuesta. Para ello hace falta cruzar las respuestas de todas las preguntas con el recuerdo de voto, tablas que están disponibles en la página *web* del CIS. Si p_j es el porcentaje de individuos que recuerdan haber votado a j y c_{ij} es, de entre estos últimos, el porcentaje de individuos que se decantan por una opción i en una pregunta, el porcentaje total de sujetos que se decantan por i en la encuesta será:

$$c_i = c_{i1}\frac{p_1}{100} + c_{i2}\frac{p_2}{100} + \ldots$$

Sin embargo, si el porcentaje real de votos en 2004 por el partido j fue $\tilde{p}_j$, entonces, una buena estimación del porcentaje real de individuos que se decantan por la opción i en la pregunta será:

$$\tilde{c}_i = c_{i1}\frac{\tilde{p}_1}{100} + c_{i2}\frac{\tilde{p}_2}{100} + \ldots$$

en lugar de c_i. Esta corrección equivale a reajustar la muestra para que refleje correctamente el recuerdo de voto. Para aplicar la fórmula anterior a los datos de la encuesta electoral, hay que tener en cuenta que ciertas opciones en la pregunta de recuerdo de voto no tienen reflejo en el voto real en 2004 y, al revés, no se pregunta si el voto del encuestado fue nulo. Por tanto, los porcentajes $\tilde{p}_j$ no son exactamente los porcentajes de voto de 2004, sino que hay que incluir aquellos encuestados que no tenían edad para votar, no recuerdan el voto o no contestan a la pregunta del recuerdo de voto en 2004 y hay que eliminar los votos nulos de los porcentajes de voto real. La siguiente fórmula refleja estas modificaciones:

$$\tilde{p}_j = \frac{100 - P(n.e.) - P(n.r.) - P(n.c.)}{100 - P(v.n.)} P_j\,(v.r.)$$

en donde P denota los porcentajes de voto nulo real en 2004 (*v.n.*), no tenía edad para votar (*n.e.*), no recuerda (*n.r.*), no contesta a la pregunta del recuerdo de voto (*n.c.*), y $P_j(v.r.)$ es el porcentaje de votos que consiguió el partido j en 2004. En la tercera columna de la Tabla I se muestran los porcentajes $\tilde{p}_j$ calculados con la fórmula anterior.

Vayamos ahora a las preguntas de la encuesta que se refieren a la intención de voto. Por razones de espacio, limitaré todo el análisis a los tres partidos más votados (en 2004 y 2008): PSOE, PP e IU, pero los lectores pueden completar el mismo estudio con el resto de los partidos utilizando los datos cruzados que están a su disposición en la página *web* del CIS.

En la Tabla II se puede ver lo que se denomina intención de voto más simpatía por un partido. Al encuestado se le pregunta en primer lugar "si las eleccio-

Tabla I

	Recuerdo de voto 2004	Voto real 2004	Porcentajes corregidos
PSOE	37,7	32,22	26,69
PP	20,0	28,53	23,63
IU/ICV	3,2	3,75	3,11
CiU	1,8	2,44	2,02
ERC	0,9	1,91	1,58
PNV	0,8	1,23	1,02
BNG	0,4	0,61	0,51
CC	0,3	0,69	0,57
EA	0,1	0,23	0,19
CHA	0,1	0,27	0,23
Na-Bai	0,1	0,18	0,15
Otro partido	1,0	1,74	1,44
En blanco	2,3	1,18	0,98
No votó	13,6	24,34	20,16
No tenía edad	4,8		4,8
No recuerda	4,9		4,9
N.C.	8,1		8,1
Votos nulos		0,76	

Tabla II

Intención + simpatía → / ↓ Recuerdo	PSOE	PP	IU	Abstención
PSOE	76,5	6,2	2,9	11,2
PP	3,7	84,1	0,3	9,8
IU	13,4	1,4	74,1	7,5
CiU	6,1	3,4	1,6	11,7
ERC	7,3	0	5,8	7,5
PNV	3,4	0	0,4	9,5
BNG	15,9	0,9	2,3	13,0
CC	6,8	15,6	4,4	18,7
EA	0	1,9	0	19,4
CHA	32,5	5,6	0	37,1
Na-Bai	3,7	0	0	18,5
Otro partido	6,1	7,8	5,4	17,0
No tenía edad	35	24,9	5,7	27,6
En blanco	13,2	10,3	1,8	65,9
No votó	22,7	17,1	3,4	50,5
No recuerda	20,2	16	2,2	53,4
N.C.	9,2	7,3	1,5	77,7

nes fueran mañana, ¿a qué partido votaría?". El resultado se denomina intención de voto. A los que a esta pregunta responden que votarían en blanco, no votarían o no saben o no contestan, se les pregunta de nuevo "¿por cuál de los siguientes partidos o coaliciones siente usted más simpatía o cuál considera más cercano a sus propias ideas?". La intención más simpatía por un determinado partido se determina sumando las respuestas a favor de dicho partido en las dos preguntas. Los resultados se pueden ver en la Tabla II, cruzados con el recuerdo de voto. Los porcentajes están siempre calculados sobre el total de respuestas de recuerdo de voto por una determinada opción. Por eso las columnas no suman cien. Las filas sí deberían sumar 100, si incluyéramos todos los partidos sobre los que se pregunta. La columna "abstención" incluye aquellos que, en las dos preguntas, no se han decantado por ningún partido, es decir, los que en la segunda han insistido en que no tienen preferencia por ninguno o han vuelto a marcar la casilla "no sabe" o "no contesta".



© iStockphoto

Disponemos ahora de todos los datos necesarios para estimar el voto en las elecciones. Para calcular el voto a IU, por ejemplo, tomamos cada entrada de la tercera columna de la Tabla II y la multiplicamos por el correspondiente porcentaje corregido de la Tabla I. Sumamos todos estos productos y obtenemos el porcentaje de voto final. Lo que hacemos así es aplicar la segunda fórmula de este artículo. Si se procede de esta forma con los tres principales partidos y con la abstención, se obtienen los siguientes resultados: PSOE 30,39 %, PP 27,98 %, IU 4,60 %, abstención 27,62 %. Finalmente, si queremos dar las estimaciones en porcentajes sobre voto válido, tendremos que eliminar la abstención, es decir, multiplicar los valores anteriores por 100/(100 – 27,62). Con ello se obtienen los siguientes resultados: PSOE 41,99 %, PP 38,66 %, IU 6,35 %.

El algoritmo completo que utiliza el CIS tiene algunas correcciones adicionales que utilizan otros cruces y que aquí no hemos incluido. Por eso la estimación final del CIS (PSOE: 40,2 %, PP: 38,7 %, IU: 5,8 %) difiere ligeramente de la calculada aquí. Sin embargo, como pueden comprobar, la corrección por recuerdo de voto es la más importante de todas las que realiza el modelo del CIS.

Sigue siendo un misterio la discrepancia entre el recuerdo de voto declarado y el voto real en 2004. Probablemente se deba a la suma de varios factores: algunos desajustes en la elección de la muestra o sesgos en la disponibilidad de las personas a contestar, respuestas no sinceras, o respuestas sinceras pero equivocadas. Estas últimas no deberían en realidad corregirse, puesto que el encuestado puede ser sincero en su respuesta sobre intención de voto, aunque sea algo olvidadizo. Las dos primeras razones de discrepancia sí se corrigen adecuadamente con el método que utiliza el CIS, puesto que si un individuo miente acerca de lo que votó en 2004, lo más probable es que también lo haga sobre su intención de voto. En cualquier caso, la corrección realizada resulta pertinente, como lo demuestran los resultados de las elecciones de este año (PSOE: 43,64 %, PP: 40,11 %, IU: 3,8 %). Las discrepancias entre la estimación y el resultado final pueden deberse perfectamente, además de a errores estadísticos, al desarrollo de la campaña electoral, ya que la encuesta se realizó entre el 21 de enero y el 4 de febrero de 2008.

Lámparas

La luz que viene

Mark Fischetti

Puede que la bombilla de incandescencia ya sea historia. Las lámparas fluorescentes compactas (CFL), que ofrecen mayor eficiencia energética, han logrado sólo modestos avances a causa de su precio elevado. Pero en diciembre de 2007, el congreso estadounidense aprobó un proyecto de ley sobre energía que modificaba la normativa sobre iluminación. Para 2012, todo fabricante que ponga en el mercado lámparas de 100 watt (W) deberá aumentar el rendimiento de éstas en un 30 por ciento respecto al de las bombillas de incandescencia actuales. Análogo requisito entrará en vigor de forma progresiva en 2013 para las lámparas de 75 W; en 2014, para las de 60 W y 40 W. Europa ha aprobado, asimismo, sus propios reglamentos. Las CFL cumplen ya las especificaciones; aunque los fabricantes se propongan mejorar los modelos viejos, las nuevas lámparas gozan de una clara ventaja, que seguirá en aumento.

La técnica que encierra una bombilla es muy refinada. El filamento de tungsteno se pone incandescente a más de 2000 grados Celsius; su grosor debe ser perfectamente uniforme (cualquier minúscula imperfección haría que se fundiera). Pero sólo alrededor del 10 por ciento de la energía que llega a la bombilla se emite en forma de luz visible; un 90 por ciento se irradia en forma de calor. El rendimiento de una CFL cuadruplica el de una lámpara de incandescencia. Por consiguiente, una CFL de 26 W ilumina tanto como una incandescente de 100 W, y consume sólo un cuarto de la energía. Los tubos fluorescentes que suelen emplearse para la iluminación cenital ofrecen una eficiencia ligeramente superior, pero no se adaptan a los portalámparas estándares, como es el caso de las lámparas CFL.

Las CFL presentan todavía ciertos inconvenientes. Algunas personas encuentran su luz demasiado hiriente. Al ojo humano le agrada ver todas las longitudes de onda; pero el revestimiento luminiscente interno del tubo no emite determinadas longitudes de onda. Se están mejorando los luminóforos para subsanar esa limitación.

Los tubos primitivos tardaban algunos minutos en emitir todo su flujo luminoso; además, zumbaban o parpadeaban. Pero las reactancias electrónicas que han sustituido a las antiguas reactancias magnéticas han dado fin a tales inconvenientes y han facilitado la reducción del tamaño de los tubos. Los fabricantes se han esforzado para desarrollar lámparas CFL más versátiles. Para rebajar los costos deberán acrecentar los volúmenes de producción.

También los diodos emisores de luz (LED) entrarían en liza en los años venideros. Las luces de estado sólido ofrecen casi la misma eficiencia y duran tres veces más que las CFL. Pero las versiones de rosca apenas llegan a iluminar como una bombilla incandescente de 25 W y son más caras. Por ahora, las lámparas fluorescentes compactas tienen un futuro brillante.

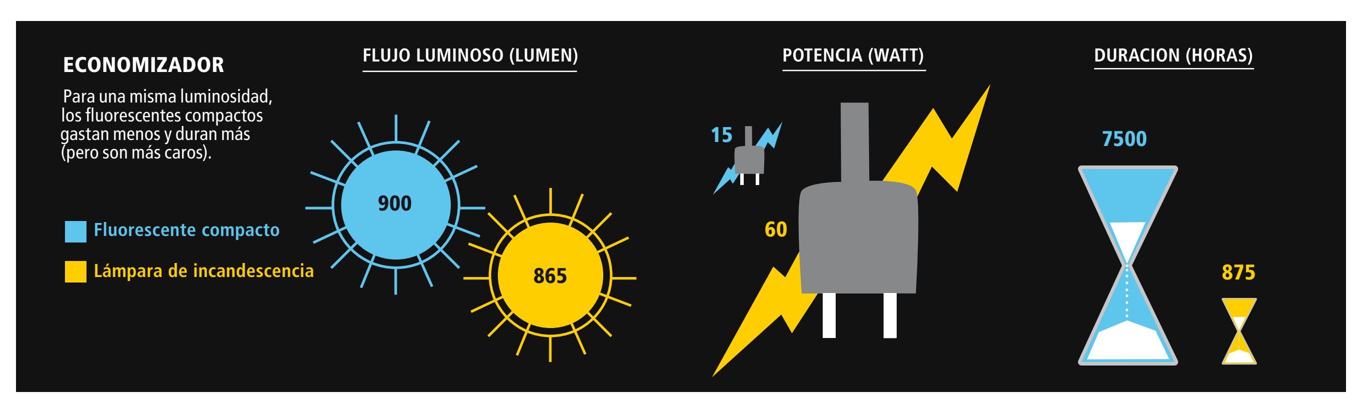
¿SABIA USTED QUE...?

- **CA/CC:** A diferencia de la mayoría de los aparatos domésticos, la bombilla de incandescencia común que se emplea en los portalámparas estándares de corriente alterna funcionaría también en un portalámparas de corriente continua. (Si es que alguien, alguna vez, se encuentra con uno.)

- **FRIGORIFICOS FRESCOS:** Las últimas mejoras en los diodos emisores de luz (LED) han impulsado a la cadena de grandes almacenes Wal-Mart a sustituir las calientes bombillas de incandescencia del interior de los embalajes de alimentos y congeladores en todas sus tiendas. Los LED desprenden menos calor, lo que reduce la carga de refrigeración, y gastan menos electricidad.

- **MERCURIO:** Tal como se advierte en el envoltorio, los tubos CFL normales contienen pequeñas cantidades de mercurio. Las lámparas fundidas deben desecharse en puntos de recogida especiales. Los fabricantes están tratando de reducir el mercurio necesario. Para defenderse de las críticas, señalan que la electricidad adicional necesaria para alimentar una lámpara de incandescencia equivalente emite mercurio, y otros contaminantes, a la atmósfera, si la energía se produce mediante la quema de carbón.

- **MANCHA MARRON:** Dentro de la ampolla, los átomos de tungsteno que se evaporan de forma gradual se acumulan en una zona, donde crean una mancha marrón. Si la ampolla está mal sellada y se infiltra aire a su interior, el tungsteno puede reaccionar con el aire formando depósitos marrones, morados o amarillos de óxido o trióxido.



DANIELA NAOMI MOLNAR

Electrodo
Luminóforo (fósforo)
Fotón
Vapor de mercurio
Electrodo
Reactancia

➤ TUBOS FLUORESCENTES

Una reactancia (*extremo derecho*) produce una alta tensión que crea un arco entre los electrodos de tungsteno. El arco excita los átomos del vapor de mercurio, que liberan fotones ultravioletas. Esos inciden en el revestimiento de fósforo del vidrio, que a su vez emite luz visible (fluoresce). La reactancia ajusta luego el voltaje y la potencia a un nivel inferior para sostener el arco. El argón (*no se muestra*) contenido en el tubo estimula el cebado y aumenta la luminosidad.



➤ LAMPARAS DE INCANDESCENCIA

Por los hilos de contacto fluye la corriente eléctrica que atraviesa un filamento resistivo, en general de tungsteno, al que calienta y pone incandescente. En el interior de la ampolla rarificada, llega un momento en que del filamento se han desprendido tantos átomos por evaporación, que en algún punto el adelgazamiento hace que se rompa. En las lámparas de más de 25 watt, los fabricantes rellenan la ampolla con un gas inerte (argón o xenón) para lentificar la evaporación.



➤ TUBOS FLUORESCENTES COMPACTOS

Funcionan como los otros fluorescentes, salvo que el tubo está arrollado. Ambos extremos se hallan unidos a un mismo chasis adaptado a los portalámparas tradicionales de incandescencia.

Lente
Hilo de conexión
Cátodo
Anodo

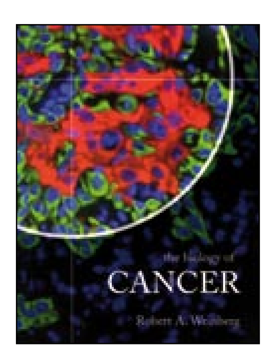
➤ DIODOS EMISORES DE LUZ

La corriente que atraviesa un diodo semiconductor provoca el movimiento de agujeros y electrones; cuando ambos chocan emiten un fotón de cierto color. Distintos semiconductores emiten diferentes colores. La apariencia de luz blanca se crea mediante la combinación de diodos rojos, azules y verdes dentro de una misma cápsula, o la cobertura con un luminóforo amarillento de un diodo azul.

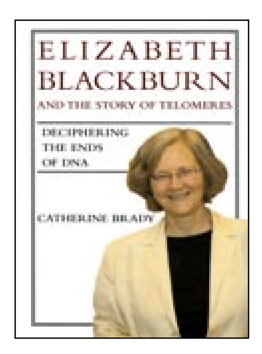


DIODO emite luz cuando chocan agujeros y electrones.

GEORGE RETSECK



THE BIOLOGY OF CANCER,
por Robert A. Weinberg.
Garland Science;
Nueva York, 2007.



ELIZABETH BLACKBURN
AND THE STORY OF TELOMERES.
DECIPHERING THE ENDS OF DNA,
por Catherine Brady. MIT Press;
Cambridge, MA., 2007.

Cáncer

La identificación del ADN de los telómeros supuso un cambio de rumbo en la investigación básica

Los animales pluricelulares aparecieron hace unos 600 millones de años. Desde entonces se ha convivido con el cáncer. En cada tanda de desarrollo y división de la célula acecha el riesgo de cáncer. Así, la incidencia de tumores crecerá de forma progresiva con el tamaño y la esperanza de vida del organismo. A lo largo de su vida, el hombre experimenta hasta 10^{16} mitosis, el proceso en virtud del cual una célula duplica su ADN y se divide para formar dos células hijas idénticas. Cada mitosis constituye una invitación a un desastre genético, sea por duplicación incorrecta del ADN, rotura inadvertida de los cromosomas o errores en su segregación. El cáncer es el punto final fenotípico de alteraciones genómicas y epigenómicas que se han acumulado en el interior de la célula, así como de las interacciones entre tales células dañadas y la estroma. Ante semejante abanico de posibles ocasiones para acumular mutaciones, resulta sorprendente que no generemos múltiples clones celulares cancerosos (*The Biology of Cancer*).

El decenio de los setenta culminó la tendencia panvírica de la biología del cáncer. Detrás de cada tumor había un virus, se admitía. Pero el descubrimiento de los oncogenes y de los genes supresores de tumores removió los cimientos. El cáncer pasó del dominio de la microbiología al de la biología celular. Uno de los promotores de esa reorientación de la investigación fue Robert A. Weinberg. Su hallazgo fundamental de la primera mutación oncogénica (*ras*) en un tumor humano puso fin a la noción de que los oncogenes se activaban sólo por virus. Su trabajo sobre cooperatividad entre diferentes oncogenes constituyó otra piedra miliar. En el libro de reseña no privilegia, empero, su extensa y decisiva aportación al campo, sino que con una generosidad laudable ha confeccionado una exhaustiva obra canónica, sin parangón. Magistral y didáctica, teje la investigación básica con la clínica, la epidemiología y la evolución histórica. Por buscarle algún punto débil se le ha criticado la menguada atención que concede a la epigenética del cáncer, limitada en su caso a la metilación.

Terminado el proyecto Genoma Humano, importa ahora acotar el extenso abanico de genes implicados en la tumorigénesis. Se cuentan por cientos los genes y las proteínas implicadas en los 110 tipos de cáncer. ¿Cuántos genes encontramos mutados en un tumor humano? Podemos ya contestar en lo concerniente al cáncer de mama y colorrectal: hay unas 80 mutaciones que alteran aminoácidos en un tumor típico.

La razón de una vida larga y en general exenta de cánceres reside en los mecanismos de defensa anticancerosos que han coevolucionado con nuestra creciente complejidad. La mayoría de esas defensas, armadas en diversas etapas, se expresan a través de circuitos de señalización intracelulares, la organización de nuestros tejidos y el sistema inmunitario. Al menos cinco o seis de esos mecanismos deben doblegarse antes de que se implante el tumor. Se conocen ya los pormenores bioquímicos de algunas etapas; así, la activación del oncogén *ras* o la inactivación del gen supresor de tumores *p53*.

La investigación avanza, por supuesto. En el campo de la epidemiología, por ejemplo, se sugería que los individuos con síndrome de Down (que portan tres copias del cromosoma 21) registraban una incidencia mínima de tumores sólidos. La hipótesis acaba de recibir corroboración experimental en un ratón transgénico con el equivalente de la trisomía inducida. Asimismo, los modelos animales habituales sobre cáncer operan mediante la transferencia de un oncogén a un embrión. Los ratones desarrollan el cáncer, pero no manifiestan la inestabilidad genómica característica de los humanos. En junio de 2007 se anunció la creación de un nuevo modelo múrido que remeda los niveles de inestabilidad genómica propios de los cánceres desarrollados en humanos. Y comienza a prestarse atención al proceso tumoral de las células madre.

La adquisición por las células humanas de rasgos neoplásicos manifiestos suele requerir varios decenios. Durante esa larga preparación insidiosa, las células recorren una larga sucesión de ciclos de crecimiento y división. Y terminan por romper con la propiedad fundamental de las células normales, a saber, su capacidad para replicarse un número limitado de veces antes de entrar en apoptosis. Las células cancerosas necesitan tornarse inmortales para formar tumores. Y necesitan, por ende, de unos telómeros funcionales, regiones terminales de los cromosomas que, a modo de escudo, evitan la fusión de las moléculas del ADN cromosómico. Durante la replicación celular las enzimas que replican el ADN se muestran incapaces de copiar la cadena de ADN en su trayecto final, lo que supone el acortamiento creciente en cada reproducción celular. Ya en 1941 Barbara McClinctock, al describir los cromosomas del maíz, anotaba que éstos poseían unas estructuras especializadas en sus extremos que, si se perdían, instaban la fusión y la generación de megacromosomas con dos o más centrómeros.

El componente en ADN de cada telómero consta de la secuencia hexanucleotídica 5′- TTAGGG-3′, que se repite en

tándem miles de veces; estas secuencias repetidas, junto con las proteínas asociadas, forman el telómero funcional. El ADN telomérico (y por ende los telómeros) de las células normales se van acortando progresivamente en cada ciclo de crecimiento y división, hasta que dejan de poder proteger los extremos de los cromosomas. En ese momento aparece la crisis, los cromosomas se fusionan y se precipita la apoptosis. Las células cancerosas incipientes salvan ese escollo mediante la expresión de la telomerasa, que elonga y regenera el ADN telomérico. La actividad de la telomerasa se advierte en entre un 85 y un 90 por ciento de los tumores humanos, en cambio se expresa a muy bajo nivel en células humanas normales. La telomerasa desempeña así un papel clave en la proliferación de las células cancerosas, en su inmortalidad.

Ese dominio de la investigación se fue configurando merced al trabajo tenaz de Elizabeth Helen Blackburn, nacida en Hobart (Tasmania) en 1948 (*Elizabeth Blackburn and the Story of Telomeres. Deciphering the Ends of DNA*). Dotada de una notable sensibilidad para las artes, leyó en su adolescencia la biografía de Marie Curie escrita por su hija Eve Curie, que marcó su rumbo a seguir. A la hora de escoger carrera, optó por la bioquímica.

Durante sus años de formación, la exploración de las vías metabólicas constituía un apartado nuclear, aunque la propia secuenciación génica comenzaba a despertar interés. Había que ir anotando paso a paso los datos analíticos recogidos. El bioquímico atendía sobre todo a las proteínas. Blackburn acometió, como proyecto de fin de carrera, bajo la supervisión de Theo Dopheide y Bartie Davidson, la caracterización y purificación de una enzima bacteriana que intervenía en la biosíntesis del aminoácido fenilalanina. Mientras preparaba ese trabajo, que sería publicado, el Nobel Fred Sanger acertó a pasar por su centro. La invitó a graduarse en el Laboratorio de Biología Molecular de Cambridge, que dirigía. Aquí trató a Sydney Brenner, James Watson y Francis Crick, dominó la secuenciación del ADN y conoció a su futuro marido John Sedat. A comienzos de los años setenta, los biólogos moleculares estaban completando el cuadro sobre la replicación enzimática del ADN.

Dispuesta a incorporarse en el laboratorio de Sanger en octubre de 1971, Blackburn leyó en el viaje desde Australia, realizado en barco, los artículos de Sanger. Blackburn tenía algún entrenamiento en el metabolismo, en las reacciones enzimáticas, pero no en el ADN ni en el ARN. Su trabajo bioquímico distaba mucho del trabajo en biología molecular que comenzaba a implantarse. "La cultura del bioquímico difería de la cultura del biólogo molecular, quien prestaba mayor valor a una solución elegante y a una deducción inteligente que al correoso análisis cuantitativo de las proteínas y las mediciones de las velocidades de reacción catalizada por enzimas.

Sanger le asignó la aplicación de los métodos de secuenciación de proteínas, que él había desarrollado, a pequeños segmentos de ARN, obtenidos por copia de fragmentos de ADN de un bacteriófago (ϕX174). Mediante la copia de ADN en ARN y posterior determinación de las secuencias de ARN, Blackburn cartografiaría la secuencia de ADN. Paso a paso, la reconstrucción de tales fragmentos permitiría determinar la secuencia completa del ADN. Sanger impartía un enfoque pragmático a la investigación: había que identificar la secuencia, sin prejuzgar nada. Resultado de sus trabajos en Cambridge, Blackburn publicó dos artículos, uno sola y otro en colaboración, de inmediato aceptados en el *Journal of Molecular Biology*.

Realizó la investigación posdoctoral en la Universidad de Yale, en el laboratorio de Joe Gall, quien se había centrado tiempo atrás en los cromosomas gigantes de los ovocitos de los anfibios y había estudiado los genes de ADN codificadores del ARN ribosómico de anfibios, insectos y protozoos. Con Mary-Lou Pardue, había desarrollado la técnica de hibridación *in situ*, cuyo empleo se difundió para localizar secuencias de ADN y de ARN en los cromosomas. Estaba por entonces investigando secuencias muy repetidas de ADN en el centrómero, estructura en cuya virtud un cromosoma se alinea a lo largo del huso mitótico, asegurando que, una vez que se divide la célula, cada célula hija recibirá una copia de cada cromosoma. Gall venía esforzándose por ensamblar la secuencia del centrómero, aplicando una variante del método de Sanger de secuenciación del ARN.

Blackburn se sentía atraída por el ADN de las regiones terminales del cromosoma. Gall acababa de descubrir cómo purificar los minicromosomas lineales de *Tetrahymena*, un protozoo unicelular; había también determinado que el ADN que cifra el ARN ribosómico se alojaba en esos minicromosomas. Blackburn empezó a trabajar con *Tetrahymena thermophila*. Observó que las regiones terminales variaban de una molécula a otra. Identificó, mediados los setenta, el motivo CCCCAA, denotado (CCCCAA)*n*, donde *n* designaba el número de repeticiones. Las tandas C4 se iteraban unas cincuenta veces por región terminal. ¿Qué mecanismos biológicos explicaban esos fenómenos? Firmado por Gall y ella, enviaron un artículo donde se exponían sus resultados al *Journal of Molecular Biology*, revista prestigiosa, la única en publicar entonces los contados resultados de secuenciación del ADN que se producían. Ese fue el primer artículo de Blackburn sobre la estructura molecular de las regiones terminales de los cromosomas.

De Yale pasó a Berkeley, al laboratorio de Herb Boyer. Blackburn siguió trabajando sobre el complejo de proteínas que asociaba con los telómeros de *Tetrahymena.* Pero con las técnicas de entonces no podía purificar el ADN en cuantía suficiente para permitirle aislar e identificar las proteínas en cuestión, que, infirió, no eran histonas. No tardó en abrir otra línea de investigación más fructífera; para demostrar que las secuencias repetitivas de los telómeros pudieran ser una estructura conservadora general, no un fenómeno peculiar de *Tetrahymena*, buscó pruebas de ADN telomérico en otros organismos. Y comprobó que las estructuras terminales de los telómeros del cromosoma macronuclear de *Glaucoma* eran como los de *Tetrahymena*, demostrando lo que ella venía sospechando desde hacía tiempo: no constituían ninguna excepción.

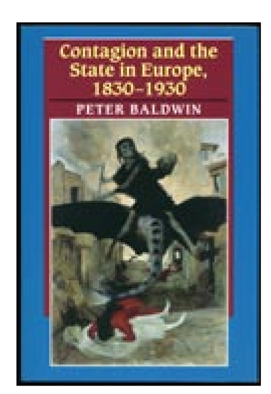
En la conferencia Gordon de 1980 presentó un resumen de su investigación sobre la estructura del ADN telomérico. Entre los asistentes estaba Jack Szostak, genético molecular de levaduras. Szostak se preguntó si los telómeros aislados y purificados de *Tetrahymena* podrían funcionar como telómeros en las células de levadura y aportar, por ende, un medio para aislar ADN telomérico de levadura. Blackburn y él se pusieron manos a la obra. Acometerían el experimento en dos fases: en la primera intentarían crear un minicromosoma lineal; si lo lograban, pasarían a un segundo estadio donde manipularían el minicromosoma para que cosechara telómeros de levadura. Con

una ligasa obtuvieron un minicromosoma lineal, que introdujeron en células de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. El experimento funcionó. Los terminales de *Tetrahymena* se comportaban como telómeros en la levadura, estabilizando el minicromosoma. En un salto espectacular a partir de las pruebas obtenidas, Blackburn avanzó la hipótesis de que los nuevos telómeros no se copiaban de un ADN preexistente, sino que se originaban *ex novo* durante la división celular.

En la Navidad de 1984 Carol W. Greider y Blackburn obtuvieron el autoradiograma que aportaba una prueba incontrovertible de la vinculación de la telomerasa con el telómero. Descubrieron que mientras un fragmento telomérico de *Tetrahymena* terminaba en cuatro G, el fragmento telomérico de la levadura terminaba en tres G. Cuando se añadía la enzima a los fragmentos de *Tetrahymena*, agregaba repeticiones TTGGGG, pero cuando la enzima se incorporaba al terminal de levadura, añadía una G antes de producir los subsecuentes TTGGGG. Con otras palabras, la enzima reconocía la "deficiencia" en el sustrato de levadura. En 1985 enviaron un manuscrito a *Cell*, sobre el papel desempeñado por la enzima en la aportación de repeticiones teloméricas. Blackburn y Greidel habían denominado en un comienzo telómero-terminal transferasa a su enzima porque podía añadir ADN; pero la nueva enzima añadía una secuencia específica (GGGGTT) al ADN telomérico, lo que sugería que pertenecía a una entidad inédita. El término telomerasa fue acuñado en 1986 por Claire Wyman, una graduanda del laboratorio de Blackburn. En 1987 Blackburn y Greider publicaron su segundo artículo en *Cell*, en donde demostraban que la telomerasa contenía un componente de ARN, cuya secuencia se apresuraron a identificar.

En 1990 Blackburn fue contratada por la Universidad de California en San Francisco. A mediados de ese decenio, Greider y Cech se propusieron aislar el componente proteico de la telomerasa. En 1996, Lundbald colaboró con Joachim Linger y Cech para identificar la secuencia del gen codificador del componente proteico en la levadura y en *Euplotes ediculatus*. Una vez publicados los resultados en marzo de 1997 era cuestión de meses la secuenciación del gen humano del componente proteico de la telomerasa. La carrera por clonar ese gen se disputó entre el laboratorio de Cech en la Universidad de Colorado en Boulder y el de Robert Weinberg en el Instituto Whitehead. El equipo de Cech fue el primero en publicar los resultados (una semana antes que el otro), pero los derechos de la patente pertenecían a Geron, en tanto que Weinberg puso a disposición de todos sus propios resultados.

—*Luis Alonso*



CONTAGION AND THE STATE IN EUROPE, 1830-1930,
por Peter Baldwin.
Cambridge University Press; Cambridge, 2005.

Epidemiología

¿Determina el régimen político de un país su planteamiento defensivo ante una enfermedad infecciosa?

Peter Baldwin, catedrático de historia de la Universidad de California en Los Angeles, aborda en este libro las medidas de salud pública adoptadas por los gobiernos de Gran Bretaña, Francia, Alemania y Suecia entre 1830 y 1930 frente al cólera, la viruela y la sífilis. Se analiza especialmente la relación entre los diferentes regímenes políticos y las estrategias defensivas llevadas a cabo frente a las enfermedades infecciosas. Para Baldwin, las medidas profilácticas fueron impulsadas por una constelación de factores geográficos, económicos, administrativos y políticos, lo que condujo a estrategias nacionales diferentes ante la enfermedad. Ni el liberalismo británico ni el intervencionismo alemán determinaron por sí solos las medidas de prevención, sino la situación geográfica de cada nación, su lugar en la trayectoria epidemiológica del contagio, junto con el resto de factores apuntados.

A través de múltiples ejemplos reivindica la poca consistencia de un dualismo estricto en cuanto al origen de la enfermedad infecciosa (anticontagio frente a contagio) o su prevención (cuarentenas o reformas), al ser los tres pilares básicos de la teoría epidemiológica —los factores locales, la predisposición individual y el contagio— mutuamente permeables. Se desmarca así de la conocida hipótesis de Ackerknecht, para quien el régimen político de un país determina su planteamiento defensivo ante una enfermedad infecciosa, de tal manera que una estructura gubernativa autoritaria sería partidaria del establecimiento de cuarentenas, mientras que un régimen liberal abogaría por medidas de saneamiento ambiental.

La obra se divide en seis extensos capítulos: Variaciones en la profilaxis; La aparición del cólera; La mayoría de edad del cólera; Viruela contra lanceta; La sífilis entre la prostitución y la promiscuidad y Las políticas de prevención.

En el primer capítulo, el autor establece el punto de partida: durante el siglo XIX las naciones europeas, que compartían en las primeras décadas del mismo estrategias profilácticas frente a la infección, las cuarentenas, acabaron adoptando medidas divergentes. En los siguientes capítulos analiza cómo, con el cólera, Gran Bretaña adoptó un sanitarismo radical frente a las cuarentenas prusianas; de qué manera la vacunación antivariólica aumentó en Alemania y fue abandonada en Suecia y Gran Bretaña y la forma en que el continente regulaba la prostitución mientras era abolida en los países nórdicos y al otro lado del Canal.

Baldwin maneja en esta obra una amplísima variedad de fuentes, desde artículos a informes técnicos y memorias académicas, así como una exhaustiva bibliografía secundaria, todo lo cual queda reflejado en unas dos mil notas a pie de página. Si algo cabe reprocharle a esta edición es la falta de una bibliografía por orden alfabético, que facilitaría la consulta de las muchas referencias utilizadas, así como un índice de materias separado del onomástico y un sumario que incluyera las subdivisiones realizadas en cada capítulo.

—*María José Báguena Cervellera*

El color de las plantas extraterrestres,

por Nancy Y. Kiang

En otros mundos, los vegetales podrían ser rojos, azules o negros.

Regeneración de las extremidades,

por Ken Muneoka, Manjong Han y David M. Gardiner

Las salamandras muestran una asombrosa capacidad para regenerar miembros amputados. El estudio de ese anfibio abre nuevas vías para la reconstrucción de miembros y tejidos del cuerpo humano.

Recuperación del mar de Aral,

por Philip Micklin y Nikolay V. Aladin

Vaciar de manera imprudente el cuarto mayor lago del mundo para regar campos de labor lo convirtió en un desierto seco y tóxico. Se está recuperando ahora su parte septentrional.



Plasmas fríos,

por Francisco José Gordillo Vázquez

Los plasmas fríos se encuentran lejos del equilibrio térmico: los electrones, iones y átomos neutros que los constituyen tienen temperaturas diferentes, fenómeno que confiere a tales plasmas unas propiedades de gran interés aplicado.

La era del grafeno,

por Andre K. Geim y Philip Kim

El grafeno, una forma alotrópica del carbono de reciente obtención, proporciona un rico sustrato para el desarrollo de la física fundamental.

